



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura



ECOLOGIA DEL CULTIVO, MANEJO Y USOS DEL NOPAL



ECOLOGIA DEL CULTIVO, MANEJO Y USOS DEL NOPAL

Editores

Prof. Paolo Inglese, *Università degli Studi di Palermo, Italia;*

Dr. Candelario Mondragon Jacobo, *Investigador Docente. Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales. Querétaro, México*

Dr. Ali Nefzaoui, *ICARDA, Túnez*

Dra. Carmen Sáenz, *Universidad de Chile, Chile*

Coordinación

Makiko Taguchi, *FAO*

Harinder Makkar, *FAO*

Mounir Louhaichi, *ICARDA*

Apoyo editorial

Ruth Duffy

Diseño y formato

Davide Moretti, *Art&Design – Rome*

Traducción al español:

Dr. Candelario Mondragon Jacobo

Producido por

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
y
el Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas
Roma, 2018

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) o del Centro Internacional de Investigación Agrícola en las Zonas Secas (ICARDA), juicio alguno sobre la condición jurídica o el nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, ni sobre sus autoridades, ni respecto de la demarcación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO o el ICARDA los aprueben o recomienden de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan. Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es) y no reflejan necesariamente los puntos de vista ni las políticas de la FAO o del ICARDA.

ISBN 978-92-5-130494-5 (FAO)
© FAO, 2018

La FAO y el ICARDA fomentan el uso, la reproducción y la difusión del material contenido en este producto informativo. Salvo que se indique lo contrario, se podrá copiar, descargar e imprimir el material con fines de estudio privado, investigación y docencia, o para su uso en productos o servicios no comerciales, siempre que se reconozca de forma adecuada a la FAO y FHA como la fuente y titular de los derechos de autor y que ello no implique en modo alguno que la FAO y FHA aprueben los puntos de vista, productos o servicios de los usuarios.

Todas las solicitudes relativas a los derechos de traducción y adaptación así como a la reventa y otros derechos de uso comercial deberán realizarse a través de www.fao.org/contact-us/licence-request o dirigirse a copyright@fao.org.

Los productos de información de la FAO están disponibles en el sitio web de la Organización (www.fao.org/publications/es) y pueden adquirirse mediante solicitud por correo electrónico dirigida a publications-sales@fao.org.

Fotografías de la portada y de los capítulos: © Fotolia, iStock photo

ÍNDICE

Prefacio	IX
Reconocimientos	X
Acrónimos	XI
1 Historia e importancia agroecológica y económica	1
<i>María Judith Ochoa y Giuseppe Barbera</i>	
Introducción	2
Historia	2
Situación actual	5
América	5
África	7
Medio Oriente	9
Australia	10
Europa	10
Perspectivas	11
2 Origen y taxonomía de <i>Opuntia ficus-indica</i>	13
<i>Roberto Kiesling y Detlev Metzger</i>	
Introducción	14
Origen y taxonomía de <i>Opuntia ficus-indica</i>	14
Números cromosómicos	15
Estudios moleculares	15
Distribución y naturalización	16
Nombres vernáculos	17
El papel de la cochinilla	18
Aspectos taxonómico y nomenclatura	19
Conclusiones	19

ÍNDICE

3	Morfología y anatomía de las <i>Platyopuntias</i>	21
	<i>Loreto Prat, Nicolas Franck y Fusa Sudzuki</i>	
	Introducción	22
	Sistema radicular	22
	Cladodio	23
	Corteza	26
	Madera	26
	Yemas florales	27
	Granos de polen	28
	Fruta	28
4	Ecofisiología y biología reproductiva del nopal	31
	<i>Paolo Inglese, Giorgia Liguori y Erick de la Barrera</i>	
	Introducción	32
	Ciclo MAC	32
	Aptitud del suelo y el cultivo de nopal	34
	Fijación de CO₂ y disponibilidad de agua	35
	Respuesta a la temperatura	37
	Respuesta a la luz	37
	Biología reproductiva	38
	Productividad de biomasa	41
	Respuestas potenciales al cambio climático	42
5	Recursos genéticos de nopal	45
	<i>Candelario Mondragón Jacobo y Innocenza Chessa</i>	
	Introducción	46
	Exploración de recursos genéticos	46
	Bancos de germoplasma, colecciones núcleo y ensayos de variedades	48
	Documentación de los recursos genéticos	48
	Uso de técnicas moleculares para explicar la variabilidad del nopal	49
	Conservación de los recursos genético	50
	Utilización: premejoramiento y mejoramiento genético	51
	Hacia una utilización sustentable del nopal	52

6 Producción de tuna y manejo postcosecha	53
<i>Johan Potgieter y Salvatore D'Aquino</i>	
Introducción	54
Planeación y establecimiento de huertas	54
Marco de plantación y diseño	57
Establecimiento	59
Manejo de la huerta	60
Cosecha	68
Tuna pelada lista para el consumo	72
Conclusiones y perspectivas futuras	73
7 Producción y utilización de nopal forrajero en la nutrición animal	77
<i>Jose C.B. Dubeux Jr., Hichem Ben Salem y Ali Nefzaoui</i>	
Introducción	78
Sistemas de producción de forraje basados en nopals	78
Prácticas de cultivo	83
Calidad de forraje	87
Utilización	90
Crecimiento animal y calidad del producto	94
Perspectivas y necesidades de investigación	95
8 Producción y utilización de nopalitos	97
<i>Candelario Mondragón Jacobo y Santiago de Jesus Méndez Gallegos</i>	
Introducción	98
Origen del uso y domesticación	98
Variedades de nopal de verdura	99
Importancia agrícola del cultivo de nopalitos	100
Sistemas de producción de nopal de verdura	101
Prácticas de producción	103
Técnicas básicas de preparación	107
9 Cría de grana cochinilla	109
<i>Liberato Portillo y Ana Lilia Viguera</i>	
Introducción	110
Biología	111
Cría de cochinilla	112
Ecología	115

10	Enfermedades del nopal	119
	<i>Giovanni Granata, Roberto Faedda y María Judith Ochoa</i>	
	Introducción	120
	Enfermedades fungosas	120
	Enfermedades bacterianas	125
	Fitoplasmas y enfermedades virales	126
	Desordenes abióticos	127
11	Insectos plaga del nopal	129
	<i>Jaime Mena Covarrubias</i>	
	Introducción	130
	Insectos	130
	Manejo integrado de plagas para los insectos plaga	137
12	Procesamiento y utilización de frutos cladodios y semillas	139
	<i>Carmen Sáenz</i>	
	Introducción	140
	Composición química y compuestos bioactivos	140
	Características tecnológicas	141
	Tecnologías de proceso	142
	Otras tecnologías	148
	Otros productos	150
	Conclusión	154
13	Propiedades nutricionales y medicinales de frutos y cladodios de nopal	155
	<i>Mónica Azucena Nazareno</i>	
	Introduction	156
	Aspectos nutricionales	156
	Fitoquímicos bioactivos de la planta de nopal	158
	Propiedades medicinales	159
	Perspectivas	162

14 El nopal en los ecosistemas: beneficios y servicios	163
<i>Mounir Louhaichi, Ali Nefzaoui y Juan Carlos Guevara</i>	
Introducción	164
Mejoramiento del pastizal	165
Reducción de la erosión del suelo	166
Cercos vivos/barreras vegetativas	168
Potencial de captura de carbono	169
Cultivos intercalados	171
Conservación de la biodiversidad	172
Conclusión y recomendaciones	174
15 Invasión globales de nopal (<i>Opuntia</i> sp.): Control, manejo y conflictos de interés	175
<i>Helmuth Zimmermann</i>	
Introducción	176
El nopal como problema	176
Manejo de especies opuntioideae invasivas	182
Utilización y conflictos de interés	187
Conclusiones	188
16 Producción de biogás	191
<i>María Teresa Varnero y Ian Homer</i>	
Introducción	192
Uso de desechos de nopal en la producción de biogas	192
Plantaciones de nopal para la producción de biogas	193
Diseño y operación de biodigestores	195
Aspectos económicos	196
Otros usos bioenergéticos	197
17 Mercadotecnia y limitaciones y estrategias de comunicación	199
<i>Marcos Mora</i>	
Introducción	200
Producción y antecedentes del mercado	201
Percepción de la calidad de la tuna: de factores intrínsecos y extrínsecos	204
Atributos de valor y preferencias del consumidor	204
Estrategia de desarrollo comercial para la tuna fresca y sus productos	205
Conclusiones	205
Bibliografía	207



Prefacio

Actualmente el cambio climático es uno de los más grandes retos que el mundo debe enfrentar, y en el futuro las sequías prolongadas y la desertificación son los temas - entre otros-, que atenderán muchos países, especialmente en África y Asia, donde los campesinos pobres y pequeños productores serán severamente afectados. Si la gente quiere sobrevivir en estas duras condiciones, sus cultivos deberán tolerar la sequía, altas temperaturas y suelos pobres.

Las cactáceas están siendo de creciente interés alrededor del mundo en particular el nopal (*Opuntia ficus-indica*) debido a sus características únicas, las cuales le proveen resiliencia a las condiciones limitantes previamente mencionadas. El nopal es capaz de crecer en tierras donde otros cultivos no prosperan. Puede ser usado para la restauración de tierras degradadas en muchos países, tales como Etiopía, es el único cultivo en el cual se puede confiar donde todos los demás han fallado. El cultivo se originó en México quien es todavía el mayor productor y consumidor del mundo, pero otros países incluyendo: Marruecos, Etiopía, Sudáfrica, Kenia, India y Pakistán, están incrementando su producción y uso.

Adicional a la resiliencia del cultivo, el nopal esta crecientemente apreciado por sus usos múltiples. La fruta y sus cladodios tiernos pueden ser consumidos por humanos, y el interés en el uso forrajero está aumentando. En Brasil, la superficie plantada para forraje supera ya las 400 mil hectáreas en la región Noreste, y es la base de la producción animal en las regiones semiáridas de este país. El cultivo del nopal forrajero también está siendo adoptado en África Sub-Sahariana y el sur de Asia. Adicionalmente, sus propiedades medicinales y usos industriales están siendo activamente investigados y promovidos.

La Red Internacional de Cooperación Técnica en Cactus (Cactus-Net) fue establecida en 1993 para apoyar la promoción de este cultivo sub-utilizado. La primera edición de este libro, *Agroecología, cultivo y usos del nopal* fue publicada en 1995. Durante los últimos 20 años se ha generado abundante conocimiento sobre el nopal, lo cual se refleja en esta edición corregida y aumentada en 2017.

La dedicación de todos los expertos quienes han contribuido a esta edición es especialmente apreciada y esperamos que este libro se convierta en un recurso útil en los países interesados en el desarrollo o el incremento de la producción de nopal. Adicionalmente, reconocemos el excelente trabajo de la CactusNet, y exhortamos a quienes no pertenezca a ella que se unan y contribuyan a expandir los resultados generados por la Red y sus miembros.



Hans Dreyer
 Director
 División de Producción y Protección
 Vegetal Organización para la Agricultura y
 Alimentación de las Naciones Unidas (FAO)



Andrew Noble
 Director General Adjunto Investigación
 Centro Internacional de Investigaciones
 Agrícolas en Zonas Áridas (ICARDA)

Reconocimientos

Fue en Agosto de 1993 cuando se estableció la Red Internacional del Nopal (CactusNet), después de las discusiones iniciadas en Santiago de Chile en Septiembre de 1992, durante el Congreso Internacional del Nopal, organizado por Fusa Sudzuki y Carmen Sáenz en la Universidad de Chile. Eulogio Pimienta, uno de los editores de la primera edición de este libro, fue también el primer Coordinador General de la CactusNet. En 1995, la Internacional Society of Horticultural Science (ISHS) la reconoció como grupo de trabajo temático, el cual ha hecho contribuciones significativas al desarrollo del conocimiento de este cultivo y su utilización. Los trabajos presentados en la serie Acta Horticulturae por el grupo de trabajo, así como en revistas científicas ha sido continuo y con un valioso impacto en el avance del conocimiento del nopal. Ahora, 25 años después estamos de regreso en Chile, orgullosos de presentar la segunda edición de *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal*. La primera edición fue un "milagro", considerada como la primera piedra del conocimiento en la literatura del nopal. Estábamos en las primeras etapas del internet. No existía el correo electrónico!. Únicamente discos flexibles y correo aéreo!! Aun así 26 autores de 18 universidades e instituciones de investigación en Chile, Alemania, Israel, México, Perú, Sudáfrica y Norteamérica contribuyeron. De manera similar a la primera edición, esta segunda edición es el resultado de la cooperación internacional. Algunos de los autores de la primera edición todavía están activos: Giuseppe Barbera, Carmen Sáenz, Candelario Mondragon, Giovanni Granata, María T. Varnero y Helmut Zimmerman. Les agradecemos a todos ellos por este gran viaje que hemos realizado juntos. Pero, también agradecemos al resto de los autores por su devoción a este cultivo y su entusiasta colaboración al presente libro. En total, hemos conjuntado un equipo de 30 autores de 10 países, superando a la colaboración recibida para la primera edición.

Durante los pasados 25 años hemos gozado de la dedicación y el apoyo decidido de la Organización de para la Agricultura y Alimentación (FAO) y del Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas (ICARDA), gracias a ellas hemos crecido considerablemente. Enrique Arias quien trabajo desde 1992 hasta su retiro de FAO, fue como el faro en la tormenta para CactusNet. Él nos guio, sirvió a la ciencia y al desarrollo tecnológico de los campesinos pobres con su devoción y compromiso diario. Desde los primeros años, tuvimos el completo apoyo de Umberto Menini, posteriormente el de Allison Hodder, ambos directivos de la División de Producción y Protección Vegetal de la FAO. Hoy, tenemos la fortuna de compartir nuestro trabajo con Makiko Taguchi quien ha dirigido la producción de esta segunda edición de nuestro libro. Estamos profundamente comprometidos con ella debido a su "firme" determinación y dedicación. Cuando Ali Nefzaoui se convirtió en el Coordinador General de la red se inicio la asociación entre FAO e ICARDA, creando las condiciones para una mayor desarrollo de las actividades de la CactusNet. Este libro fue posible gracias al apoyo de la FAO e ICARDA, además de oportunas contribuciones de la Agencia Alemana de Cooperación Internacional (GIZ).

Agradecemos a los miembros de la CactusNet. Estamos orgullosos de pertenecer a esta comunidad y de compartir la ciencia y amistad. De hecho este libro es dedicado a la memoria de Enza Chessa, un miembro distinguido de nuestra comunidad, campeona de la ciencia, la amistad y la lealtad. Ella fue capaz de sonreír hasta el final, y nosotros desde aquí le enviamos una sonrisa a su alma.

Queremos terminar este mensaje con las mismas palabras usadas para la primera edición, ya que creemos firmemente que todavía son válidas. *Esperamos sinceramente que este libro juegue un papel importante e incrementemente el conocimiento y uso del nopal, dado su potencial para la agricultura y economía de las tierras áridas y semiáridas del mundo.*

Los Editores

Acrónimos

AFLP	Amplified Length Polymorphisms
AGR	Tasa absoluta de crecimiento
ANADEC	Asociación Nacional para el Desarrollo del Nopal en Marruecos
ARS	Servicio de Investigación Agrícola (Estados Unidos de América)
Aw	Actividad del agua
AC	Antes de Cristo
CactusNet	Red Internacional del Nopal (FAO)
CAI	Índice de área de cladodio
CAM	Metabolismo del ácido crasuláceo
CBTA	Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario
CECCAM	Centro de Estudios para el Cambio en el Campo Mexicano
CENARGEN	Centro Nacional de Recursos Genéticos y Biotecnología (México)
CEZA	Centro de Estudios de Zonas Áridas (Chile)
CFU	Unidades formadoras de colonias
CIF	Centro de Investigación en Forrajes (Bolivia)
CIREN	Centro de Información en Recursos Naturales (Chile)
CIRNO	Centro de Investigación Regional Noreste (Mexico)
CMC	carboximetilcelulosa
CNERNA	Coordinación de Estudios e Investigación sobre Nutrición y Alimentos (Francia)
CNR	Consejo Nacional de Investigación (Italia)
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (México)
CONICET	Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas Argentina
CP	Proteína cruda
Cp-SSR	Chloroplast simple sequence repeats
CREZAS-CP	Centro Regional para Estudios de Zonas Áridas y Semiáridas- Colegio de Postgraduados (México)
CRUCEN	Centro Regional Universitario Centro Norte (México)
DB	Base seca
DE	Equivalente de dextrosa
DESA	Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (Naciones Unidas)
DM	Materia Seca
ADN	Acido Desoxirribonucleico
DW	Peso seco
EC	Conductividad eléctrica
EDW	Peso seco estimado
EPDM	Etilen-propilen-dieno-terpolimero
EST	Expressed sequence tag
FAUANL	Facultad de Agronomía-universidad Autónoma de Nuevo León (México)
FDA	Fibra detergente acida
FDP	Periodo de desarrollo del fruto
FI	Primer flujo (flores)
FIA	Fundación para la Innovación Agraria (Chile)
FII	Segundo flujo (flores)
FM	picados con maquina (cladodios)

FOB	Libre a bordo
FW	Peso fresco
GA	Acido giberelico
GAE	Equivalente ácido gálico
GDP	Ganancia promedio diaria de peso
GDH	Grados hora de crecimiento
GIZ	Agencia Alemana para la Cooperación Internacional
GRIN	Red de Información sobre Recursos Genéticos
HDPE	Polietileno de alta densidad
HI	Índice de cosecha
HTST	Alta temperatura-tiempo corto
IADIZA	instituto Argentino de Investigación de Zonas Áridas
IBA	Acido indol butírico
ICARDA	Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas
IFAD	Fondo Internacional para el Desarrollo Agrícola
IIZD	Instituto de Investigación para Zonas Desérticas (México)
IMZ	Imalazalilo
INCA	Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (Mexico)
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México)
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (Mexico)
INRAT	Instituto Nacional de Investigación Agrícola de Túnez
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
IPM	Manejo Integrado de Plagas
IQF	Congelado individual rápido
ISHS	Sociedad Internacional de Ciencias Hortícolas
ISPA	Instituto de Ciencias de la Producción de Alimentos (Italia)
ISSR	Inter-simple sequence repeats
ITS	internal transcriber spacer
Kc	Factor de cultivo
KC	Rebanados con cuchillo (cladodios)
LAI	Índice de área foliar
LDA	Lignina detergente acida
LPG	Gas licuado de petróleo
ME	Energía metabolizable
MF	Microfiltracion
NAFTA	Tratado del Libre Comercio de Norteamérica
NALPGRU	Unidad Nacional de Recursos Genéticos Vegetales para Zonas Áridas (EUA)
NCRE	Energía Renovable No-Convencional
NDF	Fibra detergente neutro
NEMA	Autoridad Nacional para el Manejo del Ambiente
NF	Nanofiltracion
NGO	Organización No Gubernamental
nrITS	Nuclear ribosomal internal transcriber spacer
NTU	Unidad Turbidimetrica Nefelometrica
OD	Destilación osmótica
ODEPA	Oficina de Estudios y Políticas Agrícolas
OEP	Oficina de Pasturas y Ganado (Túnez)

OM	Materia Orgánica
OP	Periodo de oviposición
PAR	Radiación fotosintéticamente activa
PCR	Polymerase chain reaction
PDO	Designación de origen protegida
PEP	Fosfoenolpiruvato
Pn	Fotosíntesis neta
PPFD	Densidad de flujo de fotones fotosintéticos
PPO	Polifenol oxidasa
PROAGRO	Programa de Desarrollo Agrícola Sustentable (Bolivia)
PUFA	Ácidos grasos poliinsaturados
PVA	Polivinil alcohol
PVC	Cloruro de polivinilo
RAPD	Random Amplified Polimorphic DNA
RCPs	Tendencias representativas de concentración
RH	Humedad relativa
RNA	Ácido ribonucleico
RO	Ósmosis reversa
ROS	Especies reactivas de oxígeno
RUE	Eficiencia de uso de agua de lluvia
SAGARPA	Secretaría de Agricultura Ganadería Pesca y Alimentación (México)
SAI	Índice de área del tallo
SC	Concentrado separado (dieta animal)
SFA	Ácidos grasos saturados
SFR	Remoción del flujo floral de primavera
SIAP	Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera (México)
SINAREFI	(Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos (México)
SLP	San Luis Potosí
SNICS	Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (México)
SOMECH	Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas
SSR	Simple sequence repeats
TBZ	Tiabendazol
TDM	Materia seca total
TMR	Ración completa mezclada
TN	Nitrógeno total
TSS	Sólidos solubles totales
UF	Ultrafiltración
UFPRE	Universidad Federal Rural de Pernambuco (Brasil)
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UNDP	Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas
UNSO	Oficina para el combate de la Desertificación y la Sequía
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
UV	Ultravioleta
VFA	Ácidos grasos volátiles
WBT	Traqueidas de banda ancha
w _w	peso del agua



01

Historia e importancia agroecológica y económica del nopal

María Judith Ochoa^a y Giuseppe Barbera^b

^a Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina

^b Universidad de Palermo, Italia



Historia e importancia agroecológica y económica del Nopal

INTRODUCCIÓN

“El evento más importante después de la creación del mundo... fue el descubrimiento de las Indias”. Con estas palabras dirigidas en 1552 al Emperador Carlos V por Francisco López de Gómara autor de la famosa obra *Historia General de las Indias* (1552), atestiguo a los conquistadores europeos los posibles resultados del encuentro entre el nuevo y viejo mundo. De acuerdo con Crosby (1972), las consecuencias del intercambio de Colon fueron particularmente significativas para la flora y la fauna y especialmente para la agricultura de muchas regiones del planeta. A través de los siglos, el intercambio ha continuado y continúa sorprendiéndonos. Durante las décadas que siguieron al primer viaje de Colon, la intensidad del intercambio de animales y plantas entre los dos mundos vario. Los conquistadores impulsieron rápidamente sus cultivos tradicionales en América: ellos tenían el conocimiento científico y tecnológico y deseaban recrear las condiciones y los hábitos de su tierra natal. La transferencia en el sentido opuesto tomo

más tiempo debido a que los europeos estaban principalmente interesados en los productos capaces de proveer una ganancia inmediata. Cuando eventualmente se interesaron en la flora nativa fue por curiosidad científica o por el gusto de lo exótico, no estaban conscientes del potencial de aquellas plantas como alimento o su posible relevancia económica. Por el contrario, los españoles inicialmente sospecharon de las culturas de los pueblos que conquistaron, y observaron sus hábitos alimenticios con precaución probando los productos locales por mera necesidad (Doria, 1992). Por estas razones tuvieron que pasar varios siglos antes de que las opuntias - grupo de plantas de gran relevancia económica de la civilización azteca-fueran completamente apreciadas en varias regiones del mundo.

HISTORIA

Cuando los españoles arribaron a la isla de La Española (actualmente Haití y República Dominicana) en el Mar Caribe, los nativos les mostraron frutos rojos de *Opuntia*, denominados “tuna” derivada de la palabra *tun* en la lengua nativa. Una anécdota divertida referida por un cronista refiere como los recién llegados se aterrorizaron al descubrir que después de consumir tunas su orina se teñía de rojo, lo que los hizo sospechar que los habían envenenado y que se desangrarían hasta morir (Kiesling, 1999a). Los primeros europeos que llegaron al continente americano apreciaron la importancia –cultural y económica- de las opuntias en el complejo mundo prehispánico. Cuando el conquistador Hernán Cortes llegó a al Altiplano Mexicano en 1519, no pudo sino notar la omnipresencia de los nopalli (palabra náhuatl que denomina a la planta de nopal), y al entrar en Tlaxcala (Díaz del Castillo, 1991) fueron obsequiados con frutos maduros (noxchli) de nopal. El nopal formo parte de la cultura Azteca; los estandartes de guerra del ejercito azteca mostraban un águila posada sobre una planta de nopal y devorando una serpiente, asimismo la capital de su imperio se llamaba Tenochtitlan, que significa “nopal sobre una roca” (actualmente Ciudad de México). La misma escena está representada en la primera página del Códice Mendoza, el cual la representa como el centro del universo (Berdan y Anwart, 1992) (**Figura 1**).

Los conquistadores comenzaron a consumir los frutos del nopal, Oviedo y Valdés - el primer autor que describió el fruto y la planta - escribió que sus compañeros “conocían la fruta y la comían con agrado” en la Española en 1515. También reporto una descripción precisa de la planta (en particular en un documento escrito en 1535), y su morfología. De acuerdo con esta descripción, la planta no solamente crecía en La Española sino también en otras islas y áreas de las Indias. Asimismo indicaba que sus semillas y piel son semejantes a las de los higos y son también apetecibles.

Otros autores mencionan el éxito que tenía la fruta entre la población nativa y la española (Donkin, 1977). En particular Oviedo y Valdés, Toribio de Motolinia y Galeotto Cei (1539-1553) describieron varias especies, enfatizando los variados usos que



Figura 1
Representación del nopal como centro del universo en el emblema de Tenochtitlan en el Códice Mendoza

tenía además de alimento: como hierba medicinal (el árbol “sanador o soldador”), una variedad utilizada para tratar fracturas de huesos, como fuente de agua y como barrera o cerca protectora. La presencia de diferentes especies es señalada también por Fray Toribio de Motolinia, quien menciona que existen “muchas especies” y por Bernardino de Sahagún y Francisco Hernández (circa 1570), quienes citaron 13 y 9 especies respectivamente. A pesar del interés, nunca se realizó una evaluación del valor económico de esta especie.

De manera contrastante, el *nocheztli* o colorante extraído del insecto conocido como grana o cochinilla fue sumamente apreciado de inmediato por los españoles, quienes le llamaron precisamente grana cochinilla. Este colorante es rico en ácido carminico y extraído del cuerpo del insecto *Dactilopius coccus*, el cual vive sobre los cladodios de algunas variedades de nopal (Reyes Agüero *et al.*, 2005). Este pigmento rojo fue altamente valorado por sus aplicaciones comerciales y fue embarcado a Europa en pequeñas cantidades desde el principio. Existen evidencias de que España lo requería desde 1521 y de acuerdo a cervantes de Salazar en 1544, fue importado por España en “grandes cantidades y a altos costos” (Donkin, 1977).

El nuevo producto fue muy exitoso debido al color rojo intenso que impartía, fue el producto de importación de América más apreciado, alcanzando un valor superior al de los metales preciosos. La naturaleza precisa de este pigmento fue durante largo tiempo sujeto de debate, hasta que Hartsoeker (1694), Van Leewenhoek (1704 y De Ruuscher (1729) descubrieran su origen animal (Donkin, 1977).

Sin embargo, a pesar de la importancia económica de la grana, la planta hospedera no fue introducida a Europa. Los españoles mantuvieron una prohibición de importación de cladodios infestados y la producción de grana por cerca de dos siglos, hasta que el doctor francés Thiery de Menonville, introdujo el insecto a los dominios franceses (Haití) en 1777. Posteriormente en 1795 el insecto fue reportado en la India y en Europa a fines del siglo XIX, donde se intentó sin éxito cultivarlo en Francia, España e Italia. Sin embargo para 1853 se reportaban 14 plantas de cría en Algeria y ya en la década de 1850-1860 las Islas Canarias estaban exportando el doble de la cantidad que se importaba de América (Donkin, 1977). El nopal fue introducido a Europa no por su valor económico sino atendiendo a su morfología inusual, completamente nueva para los europeos.

De hecho los exploradores europeos fueron en

busca de plantas raras (en ese tiempo el continente europeo pasaba por el periodo de “gabinete de las curiosidades” o Wunderkammern) y la planta de nopal reunía los requisitos para ser incluido en el. Las primeras ilustraciones de la planta de nopal y de otros cactus columnares se encuentran en la *Historia Natural y General de las Indias* escrita por el oficial español Gonzalo Fernando de Oviedo y Valdés en 1536 (Figura 2). De acuerdo a información escrita por este autor durante el segundo viaje de Colon por el Caribe no puedo decidir si es un árbol o es uno de los más espantosos monstruos entre los arboles”.

Sin embargo ni sus palabras o sus ilustraciones fueron adecuadas para proveer una descripción precisa “quizá Berruguete u otro de los grandes pintores tales como Leonardo da Vinci quien conoció en Milán o Andrea Mantegna lo dibujaría mejor”.

La introducción del nopal a Europa no está bien documentada, sin bien pudo haber sucedido antes

de 1552, cuando López de Gómara escribió acerca del nopal, dando por hecho que ya era bien conocido en España (Donkin, 1977). La planta pudo haber sido *Opuntia ficus-indica* u *O. amychlaea* - como lo señaló Berger (1912a)-. Las primeras opuntias introducidas quizá crecieron en la vecindad de Sevilla o Cádiz,

los lugares de llegada del tráfico hacia las Indias (Donkin,1977); de ahí se dispersaron entre los jardines de las mansiones aristocráticas y a los jardines botánicos. Se ha reportado su presencia en Italia alrededor de 1560 y en Alemania y los Países Bajos en 1583; y en Inglaterra en 1595 (Donkin, 1977).

El nopal fue inmediatamente bien recibido como curiosidad y decoración, Pier Andrea Mattioli - quien realizó el primer dibujo basado en plantas crecidas en Europa en 1558- escribió “esta planta merece por derecho propio estar entre los milagros de la naturaleza”. En la edición de 1568 de su obra *Discorsi* incluyó dos tablas testificando la curiosidad generalizada que rodeaba a esta planta. Los frutos probablemente no fueron apreciados - dado que difícilmente maduraban en el Norte de Italia- y

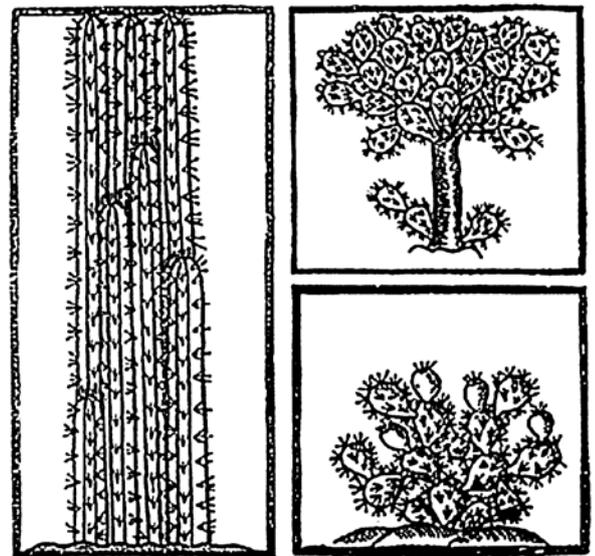


Figura 2
Dibujos de cactus columnares y dos especies de nopal por Oviedo Valdés, 1535

Mattioli repitió las palabras de Oviedo y Valdés del supuesto terrible efecto debido a su consumo; la orina se tornaba roja después de su consumo.

Los españoles llevaron el nopal - y seguramente también los insectos de *D. coccus* - a Perú, aunque en ese país también se usaban otras cochinillas para la obtención de pigmento en la era prehispánica. En Argentina se confeccionaban telas, vestimentas y ponchos teñidos con este pigmento obtenido de cochinillas nativas (De Acosta, 1590). El uso medicinal de los nopales y sus derivados fue documentado en la Medicina en el Paraguay Natural, 1771-1776, obra escrita por José Sánchez Labrador quien describió el uso del insecto de la cochinilla para curar fiebres y locura, así como el uso del fruto como refrescante y las semillas como astringente (Ruiz Moreno 1948).

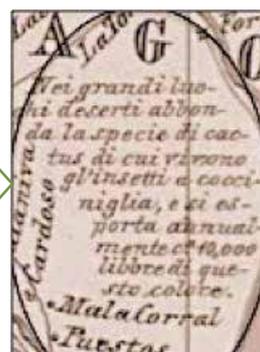
Una publicación de John Arrowsmith (Londres, 1842) acerca de la topografía La Plata y sus provincias, menciona a Santiago del Estero -ubicado al norte de Argentina-, como gran productor de grana (**Figura 3**).

En 1580, Gian Vettori o Soderini rememoraba el origen mexicano de la tuna y como se elevó hasta causar el mismo asombro que los pavorrales. Hacia el final del siglo Agostini del Riccio nombro al nopal como la planta ideal para el jardín de un rey (Tangiorgi Tomassi y Tosi, 1990). Numerosas piezas de arte han incorporado al nopal. Como es el caso de una acuarela maravillosa de la *Iconografia Plantarum* de Ulises Aldrovrandi fechada al final del siglo XVI. En 1600 el obispo de Eichstatt encargó la obra *Hortus Eystehensis*, que incluiría todas las plantas que contenía su jardín palaciego, entre ellas una ilustración del nopal. Brueghel el Viejo en su obra "Tierra de la Abundancia" (1567, en exhibición en la Alte Pinakothek de Munich), también

contiene una planta de opuntia. Gian Lorenzo Bernini quien esculpió la Fuente de los Cuatro Ríos, diseñada por Borromini ubicada en la magnífica Plaza Navona de Roma, incluyó cladodios de nopal a un lado del río de la Plata. Alrededor del siglo XVII es evidente la presencia del nopal en Europa; en una xilografía de A. Switzer (1650, depositada en la Biblioteca Nacional Central de Florencia), se muestra plantas de nopal entre otras plantas en el Jardín del Edén; y en 1650/51, J. Bahlin escribió "el nopal es cultivado en los jardines colgantes de las mansiones de los nobles".

En las regiones del norte de Europa el cultivo del nopal fue solamente posible en espacios privilegiados, donde podía sobrevivir el frío del invierno, por lo que eran colocados en invernaderos. En contraste en el Mediterráneo, el clima resultó ideal y los nopales pronto se naturalizaron, convirtiéndose en uno de los elementos comunes representativos del paisaje. La planta se dispersó sobre la costa Mediterránea debido a que los pájaros comían sus frutos y dispersaban las semillas. Los moros en su retorno al norte de África desde España lo embarcaban para combatir el escorbuto (causado por la falta de vitamina C), dado que los cladodios toleraban fácilmente los viajes largos sin perder su capacidad de enraizamiento (Kiesling, 1999a). Durante el siglo XVIII, los nopales se dispersaron hasta Sudáfrica (1772), India (1780), China (1700), e Indochina, aunque también es posible que la planta haya sido introducida a esos países antes de esos años (Donkin, 1977). El uso icónico de la planta se popularizó durante el siglo XIX en las artes, caricaturas, mercadeo y aun en la política (Barbera e Inglese, 2001). Numerosos artistas incluyendo Diego Rivera, Frida Kahlo, Roy Lichtenstein, Felice Casorati y Renato Gutusso lo usaron en sus obras.

Figura 3
Atlas Geográfico de
Santiago del Estero



En los grandes desiertos pueden encontrarse numerosas especies donde vive la cochinilla, se exportan aproximadamente 10 000 libras de este colorante.

SITUACION ACTUAL

Los nopales son ahora parte del entorno natural y de los sistemas agrícolas y se considera que *O. ficus-indica* es la cactácea de mayor valor económico en el mundo (Kiesling, 1999a). Es cultivada en América, África, Asia, Europa y Oceanía (Casas y Barbera, 2002). Se encuentra desde Canadá hasta Patagonia, Argentina, y desde el nivel del mar hasta los 5 100 m de altitud en Perú (Bravo Hollis y Scheinvar, 1995). Cuando fueron descubiertos por los primeros exploradores europeos, los nopales se distribuyeron de Mesoamérica a Cuba y otras islas del Caribe (Griffith, 2004). Donde se tornó invasiva en regiones con estación húmeda y caliente, por ejemplo en Sudáfrica y Australia (Wessels, 1988a). En climas mediterráneos, la invasión natural es limitada por la coincidencia de la humedad y temperaturas invernales frías, que contrastan con las temperaturas secas y calientes del verano de estos sitios.

Los usos tradicionales y populares del nopal presentan un amplio rango entre países y sus múltiples aplicaciones han encendido la imaginación de agricultores, ganaderos y de la comunidad científica.

AMERICAS

Argentina

Argentina posee 1 650 ha plantadas con nopal, el 80% están ubicada en la región noreste y el resto dispersa entre el centro y Cuyo (Targa *et al.*, 2013). La variedad más importante es una selección local denominada "Amarilla sin espinas" (Ochoa, 2003). La producción se dirige al mercado nacional, Córdoba y Buenos Aires. Durante los últimos cinco años, los productores han introducido nopal para forraje (*O. ficus-indica*). Las instituciones de investigación han comenzado a incorporar el nopal en sus proyectos de investigación.

Bolivia

El nopal es bien conocido en Bolivia, donde se le somete a múltiples usos. La producción se concentra en Cochabamba, Chuquisaca, Sucre, Tarija y La Paz, en áreas con 350-640 mm de lluvia anual y a altitudes de 1 500 a 3 000 m.

En años recientes, el nopal ha sido promovido en los distritos de Pasorapa y Cochabamba, apoyados por el Centro de Investigación de Forrajes (CIF) y la Universidad San Simón de Pasorapa bajo el Programa de Desarrollo Agrícola Sustentable, en la región del Valle y el Chaco la producción de tuna se ha incrementado para llenar la demanda de forraje para el ganado de zonas áridas y semiáridas de Bolivia (M. Ochoa comunicación personal).

Brasil

Se estima que en Brasil el nopal cultivado cubre una extensión de 500 000 ha (J. Dubeaux comunicación personal), dispersas en los estados de Paraíba, Pernambuco, Sergipe y Alagoas, y recientemente se ha extendido a los estados de Bahía, Rio Grande del Norte y Ceará. Las plantaciones son dedicadas casi totalmente al forraje y son pequeñas, por lo que el número de productores es muy alto. Brasil posee el sistema de producción de nopal forraje más eficiente en Sudamérica, que se caracteriza manejo intensivo de la producción y altos rendimientos. Asimismo este país posee la más alta producción nacional de forraje de nopal verde y seco del mundo.

Chile

En Chile se reportan 934.4 ha de plantaciones de nopal, superficie que se ha mantenido estable en la última década. Las principales áreas de producción de tuna se ubican en el área Metropolitana, Coquimbo y Valparaíso (Odepa, 2016). El nopal presenta dos épocas de producción por año sin mayor intervención técnica: la primera cubre de febrero a abril y la segunda de julio a septiembre. La segunda cosecha produce solamente un tercio de la primera, pero alcanza mejores precios (Sudzuki Hills *et al.*, 1993). La producción es principalmente destinada al consumo en fresco para el mercado nacional. Como resultado de proyectos recientes, existe un interés creciente hacia el uso de los cladodios del nopal como alimento - mermeladas y *nopalitos*- en la dieta chilena.

Perú

Actualmente, el 60% de los cultivos de nopal de este país están dedicados a la producción de cochinilla y el resto a la obtención de fruta para el mercado en fresco. En años recientes también ha crecido el procesamiento de frutas principalmente hacia la obtención de jugos,

El cultivo de nopal tunero peruano está dedicado principalmente al consumo doméstico no a la exportación. En el caso de la cochinilla, el pigmento es producido en 10 mil ha (80% bajo cultivo intensivo) y el resto es obtenido de plantas semidomesticadas de los distritos de Huarochi y Ayacucho. En 2012, la asociación de productores de nopal y cochinilla de Huarochi produjeron más de 5 000 toneladas de fruta para los mercados locales. Las variedades más importantes son "Blanca y "Morada.

México

Las opuntias de México presentan la diversidad genética más amplia y el más alto consumo del mundo (Reyes agüero *et al.*, 2005). Las principales especies cultivadas son. *O. ficus-indica*, *O. xocoxotle*, *O. megacantha* y *O.*



streptacantha. Adicionalmente *O. robusta*, *O. leucotricha*, *O. hyptiacantha* y *O. chaveña* son cosechadas de poblaciones silvestres de nopal de zonas semiáridas con suelos pobres, que cubren casi 3 millones de hectáreas de los estados de: Sonora, Baja California Norte y Sur, Sinaloa, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Jalisco, Guanajuato, Querétaro e Hidalgo.

Las primeras huertas formales tecnificadas de nopal con las mejores variedades de tuna fueron establecidas en las décadas de 1940 y 1950, en los estados de México, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Jalisco y Guanajuato. Este sistema llegó a su clímax en 1985, como resultado de programas gubernamentales con enfoque de beneficio social lanzados a fines de los setentas (Pimienta Barrios, 1990). Actualmente la producción de nopal y tuna está distribuida en varios estados principalmente: Morelos, Distrito Federal, Estado de México, San Luis Potosí, Zacatecas, Tamaulipas, Aguascalientes y Guanajuato (SIAP, 2014). El nopal tunero es el sexto cultivo frutícola de México después de la naranja, aguacate, plátano, mango y manzana, y es más importante que el durazno, la guayaba y uvas de mesa.

La historia reciente del cultivo de nopal en México presenta altibajos. Durante 1970 a inicios de los ochenta, el cultivo fue fuertemente subsidiado con fondos gubernamentales y promovidos extensivamente como cultivo alternativo al maíz y frijol. El servicio de extensión fue intenso pero ineficiente, basado en los escasos avances técnicos disponibles en esos tiempos. Numerosos productores plantaron huertas y produjeron fruta sin contar con un desarrollo apropiado del mercado. En este periodo el mercado fue predominantemente nacional y sujeto a altas variaciones de precios del producto. En 1985, el gobierno federal promovió la organización de productores basado en la evaluación de las necesidades y problemas del cultivo, involucrando a todos los actores de la cadena de valor; productores, comerciantes al mayoreo y menudeo y líderes de la agroindustria. La investigación se activó, pero fue frenada por la falta recurrente de fondos. Esta situación fue acorde con la tendencia global de apertura de mercados, donde el productor mexicano se expuso a la competencia de otros países sin estar capacitado o apoyado adecuadamente para aprovechar la apertura comercial.

En las regiones semiáridas del centro de México el nopal es el cultivo de temporal más confiable y redituable de utilización de tierras marginales. En áreas expuestas a la sequía, el nopal es mejor opción que el maíz o frijol, mientras que en regiones ligeramente más benignas el nopal puede complementar el ingreso obtenido por estos cultivos básicos. Las estadísticas disponibles confirman su importancia, la superficie plantada con nopal tunero actual alcanza 53 876 hectáreas, y es el sexto frutal más importante del país. Se estima que 200 mil

familias obtienen ingreso del cultivo del nopal tunero, la producción anual alcanza 428 763 ton/año (Gallegos Vázquez *et al.*, 2013). Las últimas dos décadas han sido de cambios significativos en la producción de nopal en México debido a:

- -adopción lenta pero constante de irrigación por goteo en zonas semiáridas, una práctica inusual en el siglo pasado.
- introducción del cultivo del nopal a zonas más benignas, con más lluvia y suelos de mejor calidad, principalmente en la región central y algunas zonas subtropicales del sur centro y oeste del país.
- uso generalizado de la tecnología de limpieza mecánica de las frutas.
- Uso de mejores materiales para empaque y presentación comercial más atractiva de la fruta en los supermercados de ciudades de tamaño medio, así como un renovado interés en el mercado de exportación.

Un notable interés en las propiedades nutricionales y sus efectos positivos en la salud humana atribuidos al consumo regular de tuna y nopalitos ha resultado en gran número de estudios científicos, impactando positivamente el mercado desde inicios del presente siglo. La producción de forraje por otro lado ha probado ser beneficiosa a nivel experimental y semicomercial, pero no se ha popularizado, debido quizá a la abundancia de otros forrajes, el bajo ingreso de los sistemas de producción animal y la dependencia de los pastizales

Los nopales en las huertas de solar

Estos huertos son encontrados en ambientes rurales, dado que la tuna es un componente importante de la dieta en la región del altiplano y en el norte del país. Las nopaleras de solar son todavía comunes en Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato y Aguascalientes, y su producción es usada en el autoconsumo y para venta en mercados locales.

Producción de *nopalitos*

El nopal de verdura u hortaliza - cosecha continua de cladodios tiernos para consumo humano- es común en la cocina mexicana y depende de variedades especializadas. La mayor superficie plantada se encuentra en Milpa Alta comunidad cercana a México D.F., conocidas desde los cincuentas donde la producción se ha apoyado en investigación y extensión. Junto con Morelos, son las regiones más importantes en términos de volumen y calidad del producto. "Milpa Alta" la variedad más usada para este propósito, la cual pertenece a la especie *O. ficus-indica* Mill.

Estados Unidos de América

La primera plantación de nopal de Norteamérica fue establecida por los frailes franciscanos durante la coloni-



zación de California. Al inicio del siglo pasado las variedades de nopal creadas por Luther Burbank fueron ampliamente usadas en las dietas de animales y humanos. Actualmente el nopal tunero es cultivado en California donde existen 120 hectáreas bajo producción intensiva, D'Arrigo Bros ha vendido tunas bajo esta marca desde 1928 (P. Felker comunicación personal). En Texas, Arizona y partes de California, la especie *O. lindheimerii* se ha usado frecuentemente como forraje de emergencia (Russell y Felker, 1987a). Existen también pequeñas industrias basadas en el proceso de tuna para mermeladas.

Stephen D'Arrigo emigro a la costa oeste en 1911 a la edad de 17 años. Comenzó cultivando en San José California vegetales tales como brócoli e hinojo (común en su patria pero no disponibles en Norteamérica) convirtiéndose también en distribuidor enviando tunas al este de EUA al finales de los 1920. En 1930 registro la marca "Andy Boy" con la imagen de su hijo Andrew de 6 años de edad, Cuando Stephen Darrigo falleció en 1951, Andrew tomo los destinos del negocio familiar, la cual todavía dirige a los 87 años de edad, mostrando un interés particular en las tunas. El cultivo de nopal tunero en el Valle de Santa Clara pasó a través de varios ciclos de contracción y expansión durante la Depresión, la Segunda Guerra Mundial y los años de la postguerra. Conforme la región se desarrolló y la tierra adquirió más valor, Marco y Sal LoBue, los nietos de Rancadore, movieron la mayor parte de la producción al sur, hasta Gilroy. En 1968, la familia LoBue estaba casi lista para abandonar la producción de tuna, pero Andrew D'Arrigo intervino y compro el negocio, incluyendo las huertas de nopal.

Pocos años después D'Arrigo cambio el nombre del producto de "prickly pear" - que él pensó lo denigraba- por el de *cactus pear*. Conforme la mano de obra se hizo escasa, también se descartó la práctica de la envoltura individual de papel de la fruta.

En los ochentas las plantaciones de nopal se mudaron del área de Gonzales hacia el sureste de Salinas. Este fértil valle con su agradable clima marino, es mejor conocido como la "el tazón de ensalada" del verano de Norteamérica, y puede parecer curioso que los nopales, comúnmente asociados con desiertos ardientes en la mente de los consumidores, podría adaptarse perfectamente aquí. Adicionalmente la época de producción de tunas en México es el verano, cuando este país exporta grandes cantidades de tuna a bajos precios a los EUA. Sin embargo en el clima más fresco del norte y con la ayuda de la práctica de la *scozzolata* (remoción de frutas), la cual implica descartar las flores producidas en primavera), D'Arrigo cosecha desde octubre a marzo alcanzando precios más altos porque hay menos competencia. D'Arrigo Brothers recientemente lanzaron al mercado nuevos cultivares, gracias al trabajo de R. Bunch y P. Felker.

AFRICA

La introducción del nopal al Norte de África fue acelerada por la expansión de los territorios españoles durante los siglos XVI y XVII, y también por el regreso de los moros a sus tierras al ser finalmente deportados por España en 1810, quienes llevaron con ellos el árbol de "higuera de las Indias" con sus suculentas frutas y lo plantaron alrededor de sus comunidades (Diguët, 1928).

Algeria

Históricamente la introducción del nopal en Algeria fue similar a Marruecos y Túnez. Actualmente el área dedicada al cultivo de *Opuntia* cubre más de 30 000 ha, 60% de las cuales se encuentran la municipalidad de Didi-Fredj (45 km al norte de Souk Ahras) y el resto en Ouled Mimoune, Taoura, Drèa y Quilenè (Hufpost Algeria, 2015). Esta superficie fue originalmente ampliada por el Alto Comisionado para el Desarrollo de la Estepa y la Dirección de Servicios Agrícolas y Conservación Forestal con el objetivo de control al el avance del desierto (Belgacem, 2012).

En el norte *O. ficus-indica* es usada como cerco vivo alrededor de las viviendas y las comunidades pequeñas, producen fruta en la estación seca y también proveen forraje. Las frutas colectadas de las plantas silvestres son usadas para el consumo doméstico y de los mercados locales. Los cladodios de nopal en el sur de Algeria son usados como forraje de emergencia para pequeños rumiantes y camellos.

Similar a otros países africanos el nopal esta recibiendo mayor interés en Algeria y el país tiene ahora su primera unidad de procesamiento de fruta. La infraestructura - establecida en Sid-Fredj cubre 5 000 m² puede transformar aproximadamente 2 t de fruta por hora⁻¹. Sus principales funciones son la limpieza y empaque de la fruta, la producción de aceite de la semilla, farmacéuticos, jugo, mermeladas y alimentos para animales. Esta planta de proceso representa un importante fuente de ingresos para los habitantes de la wilaya de Souk Ahras (Agencia Ecofin, 2015).

Ethiopia

La región de Tigray ubicada en la frontera con Eritrea existe nopal naturalizado, el cual localmente se conoce como *beles*. Esta planta tiene un papel cultural y económico muy importante, reflejado en el canciones y proverbios: "oh mi beles sálvame este verano hasta que la cebada alegremente venga a mi rescate". En esta región más del 85% de la población depende directamente de la agricultura para su supervivencia. Dado la continua y creciente presión humana y del ganado sobre la tierra, combinada con la declinación de la productividad del suelo y los episodios recurrentes de sequía y hambruna,



la dependencia del nopal es creciente, es usado para reducir el riesgo y mejorar la seguridad alimentaria. El nopal tiene un papel económico crucial, es una fuente de alimento humano, de forraje para animales y como combustible en algunos casos, es un medio de ingreso adicional, que incrementa la eficiencia y la viabilidad económica de pequeños agricultores de bajo ingreso. El Tigray cubre 80 000 km² y se estima que posee aproximadamente 360 000 ha de nopal, dos tercios del cual es de plantas con espina. Aproximadamente la mitad fue plantado y el resto es producto de la invasión de nopales naturalizados. Se han realizado varios proyectos para mejorar la utilización del nopal por las comunidades, sin embargo, la introducción de *Dactilopius coccus* creó un problema serio cuando se transformó en agresor de las poblaciones naturalizadas de nopal. El nopal se usa principalmente para fruta aunque no en una forma tecnificada. La FAO (Organización para la Agricultura y Alimentación) ha conducido proyectos de cooperación técnica en la región, ejecutados por miembros de la CactusNet, lo que ha incrementado el uso de nopalitos entre otros resultados.

Marruecos

El nopal fue introducido a Marruecos en 1770 y ahora está presente en el paisaje de todo el país. Como resultado de la sequía la superficie plantada ha evolucionado significativamente en las dos últimas décadas; de 50 000 ha en 1998 a más de 120 000 en el presente. La región de Guelmin-Sidi Ifni cuenta con el 50% (> 50 000) de la superficie nacional, seguido de Haouz-El Kelaade los Sraghnas con 30% (aproximadamente 33 000 ha) y Khouriga y Doukkala, en tercero y cuarto lugar, respectivamente. El incremento del área plantada en dos décadas es el resultado del continuo esfuerzos de plantación llevado a cabo por los productores en colaboración con los servicios de desarrollo y extensión como parte de un programa nacional de control de la sequía (Arba, 2009a). Actualmente con la modernización de la agricultura marroquí (Plan Marruecos Verde) se estimula la plantación de nopal como cultivo alternativo en regiones con clima menos favorable. Cada año se plantan más de 4 000 ha en el centro y sur del país (Ait Hamou, 2007). En los últimos diez años se han creado varias empresas y cooperativas para la transformación del nopal. Los principales productos son: mermeladas, vinagres, ensilados, harina y aceite de semilla de tuna. Sin embargo el interés principal es el forraje para usarse durante los años con sequía (M. Ochoa comunicación personal).

Una amenaza reciente sobre el nopal en la cuenca del Mediterráneo es el avance de la cochinilla (*Dactilopius opuntiae*). El origen de la infestación es difícil de establecer, pero probablemente llegó de España donde fue reportada en Murcia en 2006 y en Almería en 2013. La cochinilla está ahora presente en Sidi Bennour, Thamna

y Youssofia, si no se toman acciones de control, seguramente proliferará, destruyendo las plantaciones marroquíes, probablemente migrando a Algeria y Túnez. Las autoridades han llevado acciones drásticas de control, arrancando e incinerando más de 400 h de plantaciones infestadas encontradas en Sidi Bennour y Doukkala (Abdelouahed Kiddis, 2016). Esta estrategia de control se ha implementado con la colaboración del Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas (ICARDA).

Sudáfrica

Sudáfrica

El nopal sin espinas (*O. ficus-indica*) fue introducido en la región del Cabo en Sudáfrica hace más de 300 años. La planta fue llevada por los colonizadores a todas las zonas semiáridas del subcontinente, y fue cultivada como cerco vivo y por su fruta deliciosa. Las plantas con el tiempo revirtieron a su forma espinosa en un periodo de aproximadamente 150 años. Lo que contribuyó significativamente a que se convirtiera en invasiva, resultando en algunas regiones en densas poblaciones prácticamente impenetrables, principalmente al este del Cabo (Beinarta y Wotshela, 2011). El nopal llegó a invadir 2 millones de hectáreas a principios del siglo XX solamente en Sudáfrica, con serias consecuencias para la agricultura, a pesar de su utilización como forraje y frutal. En las partes más templadas del país, el nopal fue menos agresivo y los agricultores lo adoptaron extensivamente (Walters *et al.*, 2011).

Para resolver el problema de la invasión incontrolable del nopal, Sudáfrica confió en el control biológico. Aproximadamente el 80% de la infestación fue controlada con la introducción de dos insectos que se alimentan de cactus, la palomilla del nopal (*Cactoblastis cactorum*) y la cochinilla (*Dactilopius opuntiae*) (Zimmerman *et al.*, 2009).

En las provincias de Limpopo, Free State, Cabo del Este y del Oeste se han establecido bancos de germoplasma con 42 variedades de *O. ficus-indica* con propósitos de investigación. Originalmente se enfocaron extensivamente al uso forrajero (Menezes *et al.*, 2010). Sin embargo, el enfoque se ha ampliado hacia la producción intensiva de tuna, alimentación animal y consumo humano.

Túnez

A inicios de la década de 1920-1930 se inició el cultivo de nopal para forraje en Túnez basado principalmente en *O. ficus-indica* f. *inermis*. Antes de la expansión de las tierras de riego en la década de 1950 y 1960, los establos lecheros de las inmediaciones de la ciudad de Túnez al igual que otras ciudades del norte de África usaban nopal fresco como forraje (particularmente durante el otoño y el verano) complementándolo con heno, pajas y cereales. El desarrollo sistemático de las plantacio-



nes se hizo bajo la dirección de Griffith y el Gobierno de Túnez en 1932 (Le Houèrou, 2002). A principios de los 1930, durante el reparto colonial en Sidi Bouzid (Túnez Central, donde llueve en promedio 250 mm anuales) realizado exclusivamente por el gobierno bajo la condición de contratar la población nativa, inter alia, se plantó con nopal el 10% de la tierra repartida como reserva forrajera de emergencia. Esto resultó ser una sabia decisión, considerando las sequías frecuentes enfrentadas por los agricultores (Le Houèrou, 1965). Con el apoyo de organizaciones internacionales (Programa Mundial de Alimentos (WFP) y FAO, grandes áreas (~70 000) de las regiones áridas de Túnez fueron plantadas con nopal durante 1960 a 1970 para utilizarse como reserva de forraje (Le Houèrou, 2002). Mientras tanto el gobierno tunecino proveyó apoyo, basado en incentivos estatales y préstamos a bajos intereses para promover las plantaciones de nopal. Adicionalmente en 1960 el país lanzó una estrategia nacional de mejoramiento de los pastizales en la cual se plantaron 142 000 ha de nopal (OEP, 2016).

Actualmente el área plantada con nopal es de aproximadamente 600 000 ha bajo diferentes sistemas: cercas perimetrales, hileras de nopal circulando las viviendas rurales, en estructuras de consolidación para control de erosión, huertas formales para producción de fruta y, recientemente plantaciones intensivas para producción de tuna en zonas de clima más favorable. La mayoría de las plantaciones de nopal están ubicadas en zonas áridas que reciben <300 mm de lluvia anual, cuya producción es destinada al forraje y fruta. En la década pasada, en huertas intensivas donde se procuran todos los insumos, se introdujo la práctica de *scozzolatura* para producir fruta para el mercado local y exportación. En el invierno el precio de la tuna alcanza el doble del de la manzana o el plátano. En Túnez se usan las mismas variedades cultivadas en Sicilia (Rossa, Gialla y Bianca), de hecho, fueron agricultores italianos que introdujeron la práctica de *scozzolatura* al inicio de los noventa. En años recientes, se transformación agroindustrial del nopal se ha expandido y existen varias empresas, tales como "Nopal Tunisia" que se especializan en la producción y exportación de tuna orgánica, cosméticos a base de aceite de semilla de tuna, jabones y shampoos, así como productos alimenticios (mermeladas, pulpa congelada y jugo) y harina de claudios deshidratados de nopal.

CERCANO ORIENTE

En la mayoría de los países de esta región el nopal se ha usado desde hace mucho tiempo en la producción de fruta y como cercos de protección alrededor de las viviendas rurales. En años recientes, ha crecido el inte-

rés en el cultivo, pero solamente como un cultivo de segunda importancia, usualmente dedicado a tierras marginales y exclusivamente para la producción de tuna. Sin embargo, dado su bajo requerimiento de insumos y tolerancia a ambientes restrictivos, el gobierno y los agricultores han mostrado interés en cultivarlo, aprovechando su alta eficiencia de uso del agua, para incrementar el consumo local de fruta. A pesar de lo severa escasez de forraje y los efectos negativos del cambio climático en estos países, el nopal todavía no es reconocido como una buena fuente de forraje, capaz de contribuir significativamente para aliviar la escasez alimento para animales. Excepcionalmente en Siria el nopal se promovió recientemente como alimento animal, con un gran nivel de adopción.

Jordania

En este país, las plantaciones de nopal con espinas comenzaron hace 60 años, principalmente en como cercos vivos de casas y huertas. El nopal sin espinas fue introducido posteriormente, y plantado extensivamente como monocultivo en las zonas semiáridas del centro de Jordania. En general, los nopales espinosos y sin espinas (Khadri) y otros cultivares han sido importados en Jordania. La superficie plantada actualmente alcanza aproximadamente 300 ha, e incluye huertas de producción extensiva, cercos y huertos mixtos (Nasr, 2015). Los sistemas de producción extensiva están localizados principalmente en Madab, donde los agricultores producen fruta en huertas con riego suplementario. El nopal también se encuentra en plantaciones mixtas, usualmente intercalado en huertos de olivo e higuera; sin embargo debido al efecto negativo de las gloquidias de los frutos, este sistema está desapareciendo gradualmente. En las áreas pedregosas de Jordania, todavía se cultivan los nopales espinosos, debido a que las variedades sin espinas no sobreviven en estos ambientes (Nasr, 2015). Dada la severa escasez de forraje para el ganado en Jordania, se requiere más esfuerzos para que el nopal sea reconocido como forraje.

Líbano

El nopal fue introducido a Líbano desde hace mucho tiempo en las zonas costeras y al interior en altitudes de 0 a 900 msnm. Las plantas se dedican básicamente a la producción de fruta, pero también son reconocidas como cercos vivos, la fruta se usa en la producción de "arak" (bebida alcohólica destilada, no endulzada y saborizada con anís). Las plantaciones mixtas de nopal combinado con otros frutales son comunes, como también en huertos familiares para autoconsumo. Las huertas comerciales de producción intensiva de tuna existen en áreas limitadas en el sur y norte de Líbano. Las variedades cultivadas en Líbano son "Baldi" (con espinas) y sin espinas y fueron importadas de Europa,



Brasil, etc. (Chalk, *et al.*, 2012).

Siria

En Siria, similar a Jordania y Líbano, el nopal es cultivado extensivamente en áreas rurales principalmente por su fruta. Recientemente y como resultado de proyectos de investigación, se han introducido muchos cultivares de países del norte de África. Sin embargo, estas variedades han permanecido en viveros experimentales y todavía no se han diseminado entre los productores por dos razones; ignorancia de la importancia del cultivo y el interés gubernamental está centrado en el mejoramiento y producción de cebada como el principal recurso forrajero. En los últimos dos años, con la crisis Siria y la escasez de forraje, el interés en el cultivo de nopal ha crecido en las partes políticamente estables del país, tal es el caso de Swiida, Homs y en poblaciones costeras. Las variedades enviadas por ICARDA fueron plantadas como plantas madre en dos estaciones experimentales de la costa y el área rural de Damasco, y los cladodios producidos son ahora distribuidos entre los agricultores. El Fondo Internacional para el Desarrollo Agrícola (IFAD), financio el proyecto para el "desarrollo ganadero" plantando 100 ha para producción de forraje y fruta. Los resultados son muy prometedores, con una alta demanda de cladodios y alto nivel de adopción.



Países del Golfo y Yemen

En el marco de su programa regional de la Península Arábiga, ICARDA introdujo 38 accesiones de nopal obtenidas de Túnez en 2005 y las estableció en un vivero de propagación en Omán. Los cladodios producidos por estas plantas fueron llevados a estaciones experimentales en el Golfo y Yemen. Se condujeron estudios de adaptación y producción bajo las condiciones agroecológicas de la península: Omán, Qatar, Arabia Saudita, los Emiratos Árabes Unidos y Yemen. Desde 2012, se inició la diseminación del material vegetativo. En 2016 un total de 47 agricultores adoptaron el nopal sin espinas; 15 en Qatar, 10 en Omán, 9 en Yemen, 7 en Arabia Saudita, y 6 en los Emiratos Árabes Unidos.

Israel

El nopal ha sido objeto de varios proyectos en Israel, incluyendo investigaciones para inducir floración tardía y madurez en verano, otoño e invierno. Actualmente la fruta es vendida casi alrededor del año (Y. Mizrahi, pers. com.). La variedad "Ofer" es cultivada en 350 ha los valles del Negev y Arava, cerca de la frontera con Egipto, en el sur y cerca del Jordán en el oeste. La adopción de prácticas de cultivo apropiadas produce una segunda floración cuyas frutas maduran entre diciembre y abril. Existe también una producción limitada de flores secas cosechadas después de la polinización y vendidas como medicina natural para el control del agrandamiento be-

nigno de la próstata (Jonas *et al.*, 1998).

AUSTRALIA

Este país tiene una larga e interesante historia relacionada con el uso comercial del nopal, esta planta fue introducida inicialmente alrededor de 1840 para la producción de cochinilla y como cerca viva. La cochinilla fue importada, pero no pudo adaptarse debido a la abundancia de pájaros y plagas insectiles y la naciente industria de la cochinilla falló. Por el contrario la planta si se adaptó gracias al clima favorable, la ausencia de plagas y animales que la consuman. Para 1925, esta especie ya se había naturalizado y cubierto 24 millones de hectáreas. Se introdujeron enemigos naturales de la planta y las vastas poblaciones silvestres de nopal fueron erradicadas exitosamente.

La industria moderna del nopal en Australia es muy pequeña, cubriendo escasamente 200 ha cultivadas en todo el continente. La mayor diversidad y producción se concentra en huertos caseros de australianos de ascendencia Mediterránea (S. Prowse, pers. com.).

EUROPA

Italia

Italia y en particular Sicilia, representan un ejemplo atípico de la apreciación por *O. ficus-indica*. El nopal ha sido explotado desde el siglo XVIII, cuando sus usos múltiples incluyendo las cercas vivas en sistemas agrícolas y el forraje de emergencia. Fue en un tiempo conocido como "el pan del pobre" (Barbera *et al.*, 1991).

En la costa y cerca de las ciudades principales la producción de fruta se exporta hacia al continente. Este éxito económico fue reforzado por la técnica de *scozzolatura*, desarrollada por los italianos con el fin de cosechar tuna en el otoño, obteniendo fruta de mejor calidad que en la época regular de agosto. En 1975 se iniciaron las plantaciones que soportan la industria moderna de la tuna. La producción de tuna es exitosa en ambientes son ambientalmente limitativos para otros cultivos.

En Italia, el cultivo del nopal es concentrada en la isla de Sicilia (90%) de la superficie plantada de nopal (3 500 ha en una región especializada, 15 000 ha en total). Existen tres regiones importantes: San Cono, Monte Etna, Roccapalumba y Santa Margherite Belice: la precipitación pluvial es de 600 mm al año⁻¹. Se cultivan las variedades "Giulla", "Rossa" y "Bianca", las frutas de verano alcanzan el 10% de la producción, mientras la cosecha invernal (agosto-noviembre) el 90%. Con riego el rendimiento de tuna puede alcanzar 25 ton/ha⁻¹ (Basilè, 1990).

Portugal

Recientemente en Portugal el sector privado ha co-

menzado a plantar huertas comerciales de nopal tunero en las áreas semiáridas de Alentejo y Algarve. Se han establecido más de 200 ha y se plantarán 500 ha más en los próximos años gracias a los programas de apoyo a jóvenes desempleados que desean trabajar en la agricultura (Gonçalves, pers. com.).

España

En este país el nopal es solamente encontrado en huertos familiares y jardines de Andalucía, Murcia, Almería y las Islas Baleares. En las islas Canarias - Lanzarote - se cuenta con pequeñas plantaciones de nopal para producción de cochinita.

PERSPECTIVAS

“El oro verde”, “fruta del pobre”, “tesoro bajo las espigas”, “el dromedario del mundo vegetal” y “la planta del futuro”, “planta sagrada” y “árbol monstruoso”, son solamente algunos de los epítetos usados para describir la planta y la fruta del nopal (Arias Jiménez, 2013). Estos nombres denotan la importancia de los nopales en el trabajo y la vida de las personas, describen su tolerancia a la sequía y altas temperaturas, y su adaptabilidad a suelos pobres. Sin embargo, todavía existen posibilidades de desarrollo y mejoramiento.

- **Efecto invernadero.** El incremento de la concentración de CO₂ y otros gases en la atmósfera conducirá a una mayor distribución de las especies y a incremento de la productividad rebasando niveles previos (Nobel y García de Cortázar, 1991). El aumento en las plantaciones de nopal podría ser parte de una estrategia para aliviar la acumulación de CO₂ en la atmósfera. Las plantaciones de nopal pueden funcionar no únicamente como reservas de agua, sino como reservas de carbono en regiones áridas y semiáridas donde el clima es errático. En este tema se requiere más investigación.
- **Diversidad vegetal.** El conocimiento más reciente sobre los patrones evolutivos del nopal, es insuficiente para delimitar los temas de límites genéricos e identificación de especies. La integración de datos moleculares, morfológicos y biogeográficos generaría una imagen más clara de las relaciones entre los géneros y una fuente más confiable de información biológica acerca de la diversidad de esta familia excepcional (Chessa, 2010).
- **Mercado.** Desde el siglo XVI las opuntias - principalmente los nopales - han sido usados en la agricultura de subsistencia en numerosas comunidades de América, África, Asia y Europa. Sin embargo el consumo de tuna continúa restringido a ciertos mercados étnicos locales y existe exportación limitada.

Los beneficios del mercadeo eficiente de la tuna solamente se observan en Italia, México, los Estados Unidos de América y Sudáfrica (Inglese *et al.*, 2002a). Por lo tanto se requieren campañas de promoción y mercadeo así como de estrategias de educación del consumidor a nivel local e internacional (Caplan, 1990).

- **Calidad de la fruta.** Como se puede convencer a la gente a consumir tuna? A pesar de los esfuerzos de los últimos 20 años. El conocimiento es todavía escaso y solamente una parte de la información científica está disponible a los productores (Inglese *et al.*, 2002a). Es esencial que se descarte la idea de que el nopal tunero necesita pocos insumos para obtener alta producción. Esta idea equivocada ha conducido a un mal manejo de las plantaciones y la obtención de fruta de baja calidad. La experiencia italiana ha mostrado que el manejo racional de los huertos se asocia con alta calidad y mayores ganancias que el manejo limitado. Para mejorar la productividad y calidad de fruta, debe haber más conciencia de la influencia del ambiente y el manejo de las huertas sobre el crecimiento de la fruta y la maduración (Ochoa, 2003). Es también importante establecer estándares de calidad de la fruta e implementar un diseño de huertas y manejo apropiado.
- **Glòquidas y semillas, obstáculos para el mercado.** Las glòquidas adheridas a la cascara pueden ser removidas efectivamente después de la cosecha y los consumidores deben ser informados apropiadamente. Por otro lado el contenido reducido de semillas, es un reto mayor, acerca del cual ha habido importantes desarrollos en las décadas recientes, aunque algunas selecciones de “Bianca” y “Ofer” (El Beni *et al.*, 2015; Weiss *et al.*, 1993a) están disponibles, todavía es necesaria más investigación sobre el tema.
- **Cladodios como alimento humano.** Los *nopalitos* son promisorios para el futuro, y actualmente solamente en México son consumidos regularmente, por lo que son necesarios esfuerzos adicionales para diseminar su consumo. La CactusNet ha introducido los nopalitos en cocinas regionales y gastronomía en Etiopía con el proyecto “Mums for Mums” que promueve el uso de los nopalitos.
- **Usos múltiples.** Claramente hay un vasto potencial para usos no alimentarios del nopal, explotando sus propiedades multifuncionales; medicinales, nutraceuticas y cosméticas. Muchos productos han sido patentados en años recientes (<http://www.bionap.com/it>).
- **Forraje.** La explotación del nopal para forraje debe responder a las necesidades económicas de cada país y las tecnologías deben adaptarse a los requerimientos del ganado local. Brasil es un claro ejemplo del progreso en este tema.

El legado de Park s. Nobel en el desarrollo de la biología de Opuntias, combinado con la cooperación y asistencia técnica de la Red Internacional del Nopal FAO-ICARDA (CactusNet) creada en 1993, preparó el camino para el conocimiento actual del potencial de las cactáceas y su papel futuro en tierras marginales semiáridas. Los últimos 25 años han destacado la publicación de libros científicos y técnicos, folletos, actas y memorias de congresos; la organización de congresos y simposios interna-

cionales bajo los auspicios de la Sociedad Internacional de Ciencias Hortícolas (ISHS); y la implementación de proyectos, gracias a los esfuerzos de CactusNet y sus coordinadores en FAO e ICARDA. Es vital continuar hacia adelante con estos objetivos en beneficio de las regiones más pobres del mundo. El nopal es el "dro-medario del mundo vegetal" y uno de los más valiosos legados dado al mundo por la población nativa de las Américas hace más de cinco siglos.



Origen and taxonomía de *Opuntia ficus-indica*

Roberto Kiesling^a y Detlev Metzger^b

^a Instituto Argentino de Investigaciones de Zonas Áridas. Consejo de Investigación Científica y Técnica, Mendoza, Argentina

^b Grupo de Ciencias de la Vegetación y Conservación. Instituto de Biología y Ciencias Ambientales. Universidad de Oldenburg, Alemania



INTRODUCCIÓN

El nopal (*Opuntia ficus-indica*) es la cactácea que posee la mayor importancia agronómica a nivel mundial, debido no solamente a sus deliciosos frutos, sino también a sus cladodios, los cuales son usados maduros como forraje o para consumo humano cuando son tiernos (Alkämper, 1984; Kiesling, 1999a; Casas y Barbera, 2002). El cultivo y uso de los nopales data de tiempos prehistóricos, mucho antes de que los españoles arribaran a las Américas. Los cronistas indígenas fueron los primeros en reportar el valor de la planta y sus frutos, inicialmente los nopales fueron llevados a España como plantas ornamentales (Casas y Barbera, 2002). Es probable que esto haya sucedido después del primer o segundo viaje de Colon a las islas del Caribe, aunque el primer reporte definitivo está fechado en México en 1515 (en la crónica de Fernández de Oviedo, reproducida por López Piñeiro *et al.*, 1992). En este capítulo intentaremos resumir la larga historia del uso, domesticación y cultivo del nopal y especies emparentadas, así como sus problemas taxonómicos y de nomenclatura.

ORIGEN Y TAXONOMIA DE *OPUNTIA FICUS-INDICA*

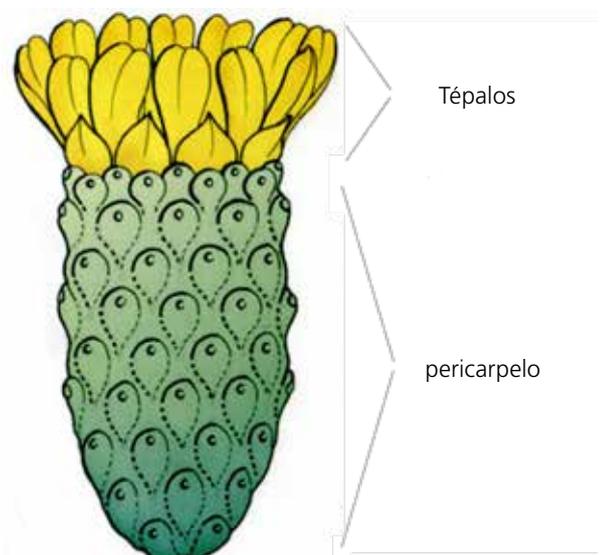
La forma sin espinas de *O. ficus-indica* - el nopal cultivado común en la agricultura actual- es el resultado de un largo proceso de selección y cultivo que no existe en las nopaleras silvestres. De acuerdo con Bravo Hollis y Sanchez Mejorada (1991), su domesticación comenzó hace 8 000 años. Reyes Agüero *et al.*, (2005) sostienen que la domesticación tuvo lugar en el sur de la Altiplanicie Mexicana meridional. Las referencias arqueológicas indican que los nopales usados hace 8 000 años no pueden ser asociados directamente con *O. ficus-indica*. Callen (1965) en un estudio de los hábitos alimenticios de los nativos mexicanos precolombinos encontró restos de epidermis de nopal en coprolitos depositados en el piso de cuevas, indicando que el consumo de nopal fue común hace varios miles de años, al menos hacia 5 200 A.C., de acuerdo a Casas y Barbera (2002) se encontraron restos arqueológicos de nopales en las

cuevas de la fase Ajuereado (14 000-8 000 A.C.). Varios taxa son mencionados como ancestros putativos de *O. ficus-indica* entre ellos *O. megacantha* Salm-Dyck y *O. streptacantha* Lemaire. Estos y algunos otros taxa y nombres son confundidos frecuentemente debido a las descripciones ambiguas y la falta de tipos (Leuemberger, (1988).

Griffiths (1914) considero a *O. megacantha* Salm-Dyck como la forma silvestres espinosa de los nopales cultivados de *O. ficus-indica* (en el sentido estricto, u *O. ficus-indica* f. *ficus-indica*), esto fue corroborado posteriormente con estudios moleculares (Griffith, 2004). Sin embargo, la explicación más plausible es que entre ellas existió un ancestro común. Ambas fueron el producto de hibridación natural y entrecruzamiento múltiple esporádico. Benson (1982) considera a *O. megacantha* como un taxón cultivado y sinónimo de *O. ficus-indica* en su "forma espinosa" y descarto la categoría de variedad o forma. Otros autores (e.g. Gibson y Nobel, 1986; Brutsch y Zimmerman, 1993) concordaron con este razonamiento. De acuerdo a Kiesling (1999 a), *O. megacantha* es la reversión hacia plantas espinosas de *O. ficus-indica* sin espinas (ver abajo).

Uno de los pocos autores que menciona a *O. ficus-indica* exclusivamente en su forma sin espinas es Bravo Hollis (1978), quien uso caracteres morfológicos para su delimitación; sin embargo, se con-

Figure 1
Una característica típica de la flor de *Opuntia ficus-indica* es su pericarpio alargado, el cual es usualmente el doble de la longitud de los tépalos



tradice varias veces (1978, pags. 288, 322). En el mismo libro enlista seis variedades hortícolas (las cuales corresponden al concepto de cultivar) basada solamente en caracteres de fruto. Scheinvar (1995) acepta tres especies separadas; *O. ficus-indica*, *O. streptacantha* y *O. amychlaea*, pero también considera a *O. ficus-indica* como la forma cultivada originada de *O. streptacantha* y la mantiene separada en un rango específico por razones prácticas (L. Scheinvar pers. comm.).

Varios nombres de las series *Streptacanthae* y *Ficus-indicae* (Britton y Rose, 1919) corresponden a variaciones morfológicas menores de *O. megacantha*. Una descripción de Britton y Rose (1919) de la serie *Ficus-indicae*, que incluye las formas más o menos espinosas del grupo aquí discutido, asevera: "Ninguna de las especies es definitivamente conocida en su estado silvestre, pero todas sin duda se originaron de ancestros tropicales, y pueden representar razas de las aquí incluídas en nuestra serie *Streptacanthae*".

Por otro lado, otros autores sostienen que existen suficientes diferencias para mantener separadas las series *Streptacanthae* y *Ficus-indicae*. Colunga García *et al.*, (1986) escribió; "Así, estos dos grupos pueden ser diferenciados basados en el tamaño de cladodio y longitudes de areola, frutos y semillas, así como la longitud y el peso de la pulpa del fruto (la porción comestible del fruto). En nuestra opinión el tamaño de cladodio, el peso de la pulpa del fruto, así como la forma de las areolas pueden diferir por causa del proceso de selección que se enfocó a mejorar la calidad para consumo humano o como forraje para animales.

Las espinas - presencia y tamaño - representan otro carácter muy variable. Aunque el desarrollo de las formas sin espinas fue favorecido durante el proceso de domesticación, lo opuesto, - reversión a plantas espinosas- es también biológicamente posible. Tales reversiones, donde algunas ramas de plantas sin espinas producen espinas después de periodos de sequía y otras situaciones de estrés, son mencionadas por varios autores (Griffiths, 1912,1914; Le Houêrou, 1966 a; Kiesling 1999 a). Adicionalmente, cuando las semillas de las formas espinosas son sembradas, un porcentaje pequeño de las plántulas desarrolla espinas; y viceversa, cuando se siembran semillas de plantas espinosas una proporción pequeña de las plántulas será sin espinas (Berger, 1905; M. Ochoa, pers.com.; I. Chessa, pers. com.). La reversión a formas sin espinas a plantas espinosas fue también observada en Sudáfrica y Sicilia (Zimmerman, 2011; Leuenberger y Arroyo, 2014). La presencia de espinas no es un carácter valioso en la taxonomía de *Opuntia* debido a que la formación de espinas no es independiente de los factores ambientales (Lara *et al.*, 2003).

NUMERO CROMOSOMICO

La determinación del número cromosómico y el nivel de ploidia son muy útiles en la taxonomía de plantas. El número cromosómico básico de las opuntias en la familia Cactáceae es $n=11$, y el número en las células somáticas es principalmente $2n=22$. En la subfamilia Opuntioidea, el 64.3% de los taxa son poliploides (Pinkava *et al.*, 1985), varios estudios cariotípicos han mostrado parientes putativos de *O. ficus-indica* con tetra, hexa u octoploide, en los parientes putativos de *O. ficus-indica* (forma espinosa de *O. megacantha*) $n=44$ (Pinkava *et al.*, 1973); *O. streptacantha* $n=44$ (Pinkava y Parfitt, 1982); *O. streptacantha* $2n=88$ (Palomino y Heras, 2001); *O. amychlaea* y *O. megacantha* $2n=88$ (Sosa y Acosta, 1966); *O. polyacantha* $2n=44, 66$ (Stocckwell, 1935). También han sido reportados octoploides ($2n=88$) para otros taxa de la serie *Streptacanthae* (incluyendo ser. *Ficus-indicae*) (Segura *et al.*, 2007; Majure *et al.*, 2012a). La poliploidia es favorecida por la hibridación. La hibridación natural interespecífica en el género *Opuntia* ha sido probada por varios estudios (e.g. Benson y Walkington, 1965; Grant y Grant, 1982; Griffith, 2003; McLeod, 1975) y la hibridación bajo cultivo es común. La ocurrencia de altos niveles de ploidia en cultivos cultivados en comparación con plantas silvestres es obviamente evidente en *O. ficus-indica* (Mondragon Jacobo y Bordelon, 1996). Solamente para *O. ficus-indica*, muchos conteos de cromosomas han mostrado que las formas sin espinas y espinosas son octoploides (Pinkava *et al.*, 1973, 1992). Las plantas sin espinas cultivadas en Sicilia son octoploides (Barbera e Inglese, 1993). Sin embargo, estas variedades han sido también reportadas como hepta-, penta-, hexa-, y diploides, así pues existe variación en los números cromosómicos, dependiendo del origen geográfico (Spencer, 1955; Weedon y Powell, 1978; Pinkava, 2002; Majure *et al.*, 2012 a)- a menos de que las diferencias en número cromosómico sean el resultado de material identificado erróneamente o anomalías en la meiosis. McLeod (1975) indicó la presencia de especímenes híbridos con $2n=77$, intermedios entre *O. ficus-indica* y *O. megacantha* octoploide ($2n=88$) y *O. phaeacantha* var. *major* Engelm. (hexaploide $2n=66$). Carpio (1952) menciona también $2n=44$ para *O. ficus-indica*. Este autor sugiere que las anomalías meióticas y la existencia de tetravalentes muestran que *O. ficus-indica* es un aloploiploide originado de dos especies con $2n=44$ o un autopoliploide. La aloploidia de *O. ficus-indica* fue confirmada por Griffith (2004).

ESTUDIOS MOLECULARES

Dado que los estudios morfológicos resultaron en diferentes hipótesis taxonómicas, se esperaban mayor pro-



fundidad en los resultados de los estudios moleculares (principalmente de ADN) en relación a la variabilidad, la interrelación y el origen de las especies de *Opuntia* y de *O. ficus-indica* en particular. Aunque varios estudios se centraron principalmente en la diversidad genética de los cultivares (e.g. Bendhifi *et al.*, 2013; El Finti *et al.*, 2013; Ganopoulos *et al.*, 2015) algunos permitieron profundizar hacia la diferenciación de *O. ficus-indica*. Wang *et al.*, (1999) condujo un estudio de 5 variedades de México y Chile, dos accesiones ornamentales provenientes de Texas y una de nopalito de México. Los análisis de ADN indicaron diferencias significativas entre accesiones comerciales, pero solo diferencias muy ligeras entre formas sin espinas. La diversidad genética de los nopales cultivados parece ser en general muy baja, probablemente a que son originarios de una base genética muy estrecha (Boyle y Anderson, 2002).

En un trabajo de Labra *et al.*, (2003), los datos moleculares revelaron una alta similaridad genética entre *O. ficus-indica* y *O. megacantha* ya que la única diferencia morfológica discernible entre ellas es la presencia de espinas. Los autores concluyeron que *O. ficus-indica* podría ser considerada como la forma domesticada de *O. megacantha*.

En otro estudio, Griffith (2004), sobre el origen de *O. ficus-indica*, usando datos moleculares encontraron una linaje filogenético compartido por *O. ficus-indica*, *O. streptacantha*, *O. tomentosa*, *O. leucotricha* y *O. hyptiacantha*, todas ellas colectadas en las regiones central y sur de México (reconocidos como centros de diversidad de *Opuntia* - Barthlott *et al.*, 2015). Los análisis apoyaron la hipótesis de que el centro de domesticación fue la región central de México, y que *O. ficus-indica* puede ser polifiletico, i.e. que desciende de diferentes linajes. Lo anterior podría ser el resultado de la hibridación (natural o bajo cultivo), la derivación de múltiples clones de varias líneas parentales, o linajes, el acomodo de muchas copias ITS (internal transcribed spacer) en una población ancestral de la cual *O. ficus-indica* y otras especies muy emparentadas pudieron haberse originado (Griffith, 2004). El trabajo de Caruso *et al.*, (2010) sobre la diversidad genética de las variedades cultivadas de *O. ficus-indica*, apoyo la hipótesis de que *O. ficus-indica* consiste de un grupo de clones no emparentados, derivados de diferentes especies progenitoras y seleccionados por sus diferentes características agronómicas.

Majure *et al.* (2012b), concluyeron que *O. ficus-indica* es una de varias especies originadas de eventos de poliploidización causados por la hibridación de especies que pertenecen a diferentes linajes. Por otro lado, en las muestras de *O. ficus-indica* estudiadas por Caruso *et al.*, (2010) no se agruparon por separado de las especies: *O. amychlaea*, *O. megacantha*, *O. streptacantha*, *O. fuscicaulis* y *O. albicarpa*, indicando que la posición taxonómica actual y los patrones genéticos no mos-

traron buen ajuste. En el trabajo de Lyra *et al.* (2013 a) sobre las características de los cultivares de cuatro especies (*O. ficus-indica*, *O. albicarpa*, *O. streptacantha* y *O. robusta*) por medio de un marcador ITS, no fue posible asignar las muestras de estas especies a linajes separados. La dificultad pudo haberse atribuido al hecho de que las muestras tienen origen híbrido o a que tienen ancestros comunes. Valdez Moctezuma *et al.*, (2015) avanzaron sobre esta suposición cuando encontraron que fue imposible asignar diferentes posiciones filogenéticas o clades a *O. ficus-indica*, *O. albicarpa* y *O. megacantha*. De manera similar, Samah *et al.*, (2015) no pudieron encontrar límites claros entre *O. ficus-indica*, *O. albicarpa*, *O. megacantha*, *O. streptacantha*, *O. lasiacantha* y *O. hyptiacantha*. En el estudio molecular conducido por Astello Garcia *et al.*, (2015) sobre la composición molecular de cinco especies de *Opuntia*, no se pudo determinar el gradiente de domesticación de *O. ficus-indica*, cuando los diferentes cultivares de estas especies se agruparon en diferentes clusters. Mientras que el estudio no pudo identificar al ancestro de *O. ficus-indica*, si se pudo determinar que *O. hyptiacantha* podría estar relacionado con la mayoría de las muestras estudiadas de *O. ficus-indica*. En una comparación de tres taxas de *Opuntias* cultivadas en Corea conducida por Srikanth y Whang (2015) encontraron que la *O. ficus-indica* coreana está emparentada cercanamente con *O. engelmannii* y *O. ellisiana*, pero no con las muestras de *O. ficus-indica* conseguidas de la base de datos del GenBank. Los estudios moleculares revelan en general las fallas de la taxonomía actual de las especies y variedades del complejo *O. ficus-indica*, y cuestionan si estos problemas son causados por hibridación, respuestas genéticas adaptativas, plasticidad fenotípica, bases epigenéticas y otros factores (Valdez Moctezuma *et al.*, 2014).

DISTRIBUCION Y NATURALIZACION

Mientras que los ancestros del nopal se originaron en el centro de México (Griffith, 2004), *O. ficus-indica* ha sido llevado a otras áreas del mundo con climas más cálidos. Después de la introducción de *O. ficus-indica* a España alrededor de los años 1500, esta especie y otras del mismo género se dispersaron y naturalizaron por el área del Mediterráneo, convirtiéndose pronto en un elemento característico del paisaje local. Para 1550 se habría dispersado en toda Europa (Mottram, 2013). Por lo tanto no es sorprendente que se haya descrito una sola especie *O. amychlaea* Ten. En 1826, supuestamente originaria de Italia, la cual habría sido colectada cerca del poblado de Amychlea (Monticello en la Italia actual). Esta corresponde a la forma espinosa de *O. ficus-indica*. *O. amychlaea* como una forma de *O. ficus-indica* por Schelle (1907); por esta razón, en



el rango taxonómico asignado en el nombre antiguo fue *Opuntia ficus-indica* f. *amychlaea* (Ten.) Schelle. Berger (1905, 1912b) también asumió que la *Opuntia* establecida Italia debe ser la forma original de *O. ficus-indica* i.e. en su forma ancestral. Una forma de *O. ficus-indica* de Argentina fue también descrita como una nueva especie (*O. cordobensis* Speg.) un caso similar se presentó en Bolivia (*O. arcei* Cardenas) (Kiesling, 2013). Al comienzo del siglo XX, el botánico americano David Griffiths realizó una evaluación taxonómica y agronómica de las opuntias cultivadas en Texas (Benson y Walkington, 1965; Walkington, 1968), describiendo varias muestras de especies cultivadas - mejor descritas como variedades- y consideradas actualmente como sinónimos o híbridos de *O. ficus-indica* (e.g. *O. fuscicaulis*, Griffiths, 1908; Kiesling et al 2008). En el siglo XVIII *O. ficus-indica* fue introducida a otros continentes por navegantes - aprovechando su alto contenido de vitamina C y su baja perecibilidad- y usada como hortaliza para la prevención del escorbuto (Diguët, 1928). Ellos también la transportaron para:

- llenar la demanda de carmín derivado de la cochinilla, insecto que se alimenta del nopal
- usarla como forraje
- incorporarla en la dieta humana
- construcción de cercas vivas.

Los nopales se adaptan a condiciones secas, por lo que pudieron escapar fácilmente y naturalizarse en las zonas áridas de África, Asia y Australia. Ya para entonces el nopal había sido introducido en Sudamérica por los conquistadores españoles, por ejemplo en Bolivia (Hoffman, 1955). Los nopales se dispersaron rápidamente en muchas regiones, algunas veces convirtiéndose en plantas invasivas amenazando la biodiversidad nativa y la tierra para uso agrícola (Brutschy Zimmerman, 1993; Barbera e Inglese, 1993). Actualmente el nopal está naturalizado en 26 países fuera de su hábitat nativo (Novoa et al., 2014).

En todos los países tropicales donde se cultiva o se ha naturalizado el nopal ha sufrido alteraciones genéticas y modificaciones fenéticas, resultando en nuevas formas que se han distinguido y nombrado formalmente. Algunas de ellas están clasificadas como especies o variedades, aun cuando una clasificación y nombramiento de variedades como cultivares de las dos formas (*O. ficus-indica* f. *amychlaea* y *O. ficus-indica* f. *ficus-indica*) sería más apropiada (Brickell et al., eds. 2009).

Mientras que existen numerosos registros de la introducción del nopal sin espinas *O. ficus-indica* f. *ficus-indica* a diferentes países, se debe anotar que las referencias acerca de la introducción del nopal con espinas son casi inexistentes.

NOMBRES VERNACULOS

Dada la importancia del nopal y sus numerosos beneficios, se le han asignado muchos nombres en su lugar de origen así como en los lugares donde se ha introducido (Reyes Agüero et al., 2005). Algunos son un buen indicador del lugar de donde fueron introducidos o distribuidos.

El nombre de "tuna" es de origen caribeño (Bravo Hollis y Sanchez Mejorada, 1991; y fue usado por los primeros españoles que arribaron a las Américas. Para ser preciso es una palabra del Taino (Moringo, 1966). Usualmente se refiere a los frutos, pero también es usada para las partes vegetativas de la plantas de las especies de *Opuntia*. El nombre es usado regularmente en extensas áreas de las Islas, lo que sugiere que fue el primer nombre que conocieron los españoles, aun antes de conocer los nombres mexicanos, dado que ellos llegaron a las islas antes que al continente.

"Nopal" es el nombre mexicano derivado del náhuatl *Nopalli* (Bavo Hollis y Sanchez Mejorada, 1991;558; Moringo 1966, 424) el cual es usado para varias especies, Tenochtili es el nombre original usado en muchos lugares de México.

El primer nombre español para el nopal fue higo de Indias, en referencia a su origen, lo que dio lugar al nombre científico; *Cactus ficus-indica* Linnè. El epíteto *ficus-indica* fue usado como frase diagnóstica desde antes de Linneo, para designar algunas otras especies más o menos similares al nopal. En otros idiomas, se usan nombres vernáculos similares: figo-da india (Portugués); indian fig (Ingles); figuier de l'Inde (Frances); indianische feige (Aleman); fico d'India (Italiano) (Reynolds y Arias, 2001).

Otro nombre ampliamente usado es el de tuna de Castilla (o nopal de Castilla) obviamente derivado del nombre del antiguo reino español de Castilla, desde donde el nopal fue distribuido a otros países. Le Houërou (1966a) menciona a Andalucía como el primer centro de propagación del nopal en el continente europeo - el lugar de retorno de Cristóbal Colon después de sus viajes-. Después de diseminarse por España, el nopal fue introducido al Norte de África, donde fue llamado *higo de los cristianos*. Actualmente la forma con espinas está muy diseminada en Marruecos, donde se le denomina *tapia* (una referencia a la palabra española usada para cerca (A. Prina, com. pers.). El nombre *sabra* - palabra usada para referirse a los nativos y a la planta del nopal - lo que confirma cuan extendido estaba su uso en la región Mediterránea. De hecho, el nopal es frecuentemente usado para ilustrar estampillas postales en varios países alrededor del Mediterráneo.

En 1769, los misioneros franciscanos llevaron el nopal cultivado de México a California, donde se le conoció como "misión cactus" (Benson y Walkington, 1965; Walkington, 1968). Sin embargo, no se conoce si los nativos cultivaban el nopal antes del arribo de los franciscanos.



Figura 2

La morfología de espinas, cladodios y frutos fue alterada por el hombre durante un prolongado proceso de selección

Walkington (1968) usó el nombre de nopal en su sentido amplio.

El nopal es muy importante para la economía del noreste de Brasil, donde es usado todo el año para forraje con el nombre de *palma forrageira*. No se conoce cuando fue introducido a ese país (Domingues, 1963). *Palma-de-gado* es otro nombre común usado para denominar a *O. ficus-indica* en esa región. Existen otros nombres vernáculos que usan la palabra "palma" que son usados en algunas regiones del estado de Bahía, donde los cladodios son usados como forraje y las frutas, mucilago y raíces son usados en la nutrición y medicina humana (Andrade, 2008).

EL PAPEL DE LA COCHINILLA

La cochinilla es un insecto parásito de muchas especies de nopal, incluyendo a *Opuntia*. Las cochinillas muestran preferencia específica por los nopales, la grana (*Dactilopius coccus*), tiene una preferencia absoluta por *O. ficus-indica* así como por taxa considerados sinónimos o que están cercanamente relacionados (e.g. *O. megacantha*, *O. streptacantha*, *O. cordobensis*). José de Acosta (1950), citando a Di Lullo, (1944) escribió acerca de los tunales domésticos de el Alto y Bajo Perú (actualmente Bolivia y Perú), y sus observaciones concuerdan con el conocimiento actual de *O. ficus-indica*, puede por lo tanto deducirse que el nopal estaba probablemente presente ya en esas áreas. En Perú, el uso de la grana data del período prehispánico, probablemente de los tiempos de Cristo (Marín, 1991); Sáenz et al, 2002); sin embargo, no es claro si se trataba de *D. coccus* u otra especie de cochinilla. Fester (1941) y Fester y Lesow (1943) mencionaron que un análisis espectrométrico de muestras de textiles prehispánicos (Paracas del Perú) y tejidos del Norte de Argentina demostró que el colorante rojo no se originó de *D. coccus* en México y América Central sino de otras especies de *Dactilopius*.

La importancia económica de la producción de cochinilla en los siglos XIX y XX condujo a la introducción del parásito y su hospedero a varios países ubicados fuera de su área de distribución nativa. De acuerdo con Piña (1981), *D. coccus* fue introducido a Perú en el siglo XIX, antes de que el país empezara a exportar grana en 1830.

Lafone Quevedo (1927) describió como la grana era cosechada en Argentina del *quiscaloro* (nombre vernáculo de una especie silvestre de nopal *O. sulfurea* y *O. anacanta*) entre otras. De acuerdo a los entomólogos argentinos Claps y de Haro



(2001) existen cinco especies de *Dactilopius* productoras de pigmento rojo nativas de Argentina. Una sexta especie es *D. coccus*; encontrada en los ochentas en *O. ficus-indica* silvestres y naturalizadas. El expresidente Menem introdujo *D. coccus* para incentivar la producción de grana en Argentina. Mientras este intento no tuvo éxito en 1999 se registró por primera vez la presencia de *D. coccus* naturalizado en La Rioja, Argentina (De Haro y Clapps, 1999). Posteriormente hubo reportes similares en Salta (Van Dam, 2015). Así pues, es plausible que el colorante rojo extraído en el pasado fuera obtenido de otras especies de *Dactilopius*. Los mismos investigadores establecen que mientras las cochinillas nativas viven en diferentes especies de cactáceas, y no viven en *O. ficus-indica* y *O. cordobensis*, un firme indicador de la especificidad-específica. De acuerdo a Van Dam et al., (2015), *D. coccus* es una forma domesticada de la misma manera que se asume para *O. ficus-indica*.

De los registros conocidos se puede deducir que *D. coccus* no estaba presente en Sudamérica andina antes del arribo de los conquistadores españoles.

ASPECTOS TAXONOMICOS Y DE NOMENCLATURA

Las diferentes entidades consideradas y denominadas bajo diferentes nombres científicos como especies corresponden en el sentido estricto a una sola entidad biológica *O. ficus-indica*, la cual no es una especie natural (Kiesling, 2013), sino más bien un complejo de cultivares y clones naturalizados.

O. ficus-indica puede ser distinguida de otras especies por varios caracteres. El receptáculo de la flor y posteriormente el fruto tiene numerosas areolas (≥ 38), y unos cuantos cultivares poseen menos (Pinkava et al., 1992; Kiesling, 1999a); las areolas están situadas mayormente en tubérculos muy notorios. Otras especies de *Opuntia* presentan pocas areolas en las flores y frutos, y se ubican en tubérculos menos prominentes.

El nombre de *O. ficus-indica* tiene prioridad sobre otros nombres dados a esta especie (Kiesling, 1999b). Los tipos nomenclaturales basados en especímenes de herbario, los cuales determinan la aplicación de nombres, no fueron designados para *O. ficus-indica* hasta 1991, y para *O. streptacantha* hasta 2010 (Leuenberger, 1991; Scheinvar et al., 2010), aunque los tres nombres fueron publicados en los siglos XVIII o XIX y ha sido usado ampliamente desde entonces. El espécimen escogido como tipo nomenclatural (lectotipo) de *O. ficus-indica* (Leuenberger, 1991) corresponde a una planta sin o con espinas muy pequeñas. Sin embargo, la presencia o ausencia de espinas no es un carácter útil para distinguir a *O. ficus-indica* de otras especies, y las formas sin espinas y con espinas deben de ser consideradas como fenotipos diferentes de una especie. De cualquier forma, este carácter se usa aquí para separar las plantas con y sin espinas de *O. ficus-indica* formalmente en el rango de forma (el nivel más bajo de las categorías taxonómicas), aun cuando ambas formas puede surgir una de otra.

Opuntia ficus-indica (L.) Mill., Gard. Dict. ed. 8, Nr. 2; 1768

Basionimia: *Cactus ficus-indica* L., Sp. pl. : 468. 1753. Plantas de hábito arbustivo o arbóreo, usualmente con troncos bien desarrollados. Los segmentos del tallo son variables, ampliamente abovados u oblongos a espatulados, aplanados, de 20-50 cm de longitud, 20-30 cm de anchura, aproximadamente de 2 cm de grosor, verde opaco, cubiertos por una capa delgada de cera, de 2-5 cm de separación entre areolas. Las gloquidas se caen muy temprano, espinas ausentes o 2 (-7) por areola, lar-

go entre 0.5-1.0 cm blanquecinas. Las flores son amarillas, rara vez anaranjadas, de 6-8 cm de longitud, 5-10 cm de diámetro durante anthesis. Los frutos presentan numerosas areolas (aprox. 30-40), con gloquidas, rara vez con espinas, tuberculadas, ovoides a oblongos, de 6 (-8) cm de longitud, 3 (-5) cm de diámetro, amarillas, anaranjadas, rosado-verdosas o rojizas.

Opuntia ficus-indica f. *ficus-indica*

Sinónimos: *Opuntia ficus-indica* var. *gymnocarpa* (F.A.C. Weber) Speg., Anales Mus. Nac. Buenos Aires ser. 3,4: 512. 1905. *Opuntia ficus-indica* var. *decumana* (Haw.) Speg., Anales Mus. Nac. Buenos Aires ser. 3,4: 512. 1905. *Opuntia ficus-barbarica* A. Berger. Monatsschr. Kakteenk. 22: 181. 1912. *Opuntia tuna-blanca* Speg. An. Soc. Cient. Arg. 99: 107. 1925.

Areolas sin espinas o únicamente con espinas pequeñas y débiles

Opuntia ficus-indica f. *amyclaea* (Ten.) Schelle, Handb. Kakteenkultur: 51. 1907

Basionimia: *Opuntia amyclaea* Ten., Fl. Neap. Prod. App.: 15. 1826.

Sinónimos: *Opuntia ficus-indica* var. *amyclaea* (Ten.) A. Berger, Hort. Mortol: 411. 1912. *Opuntia megacantha* Salm-Dyck, Hort. Dyck.: 363. 1834. *Opuntia streptacantha* Lem., Cact. Gen. Sp. Nov. 62. 1839. *Opuntia cordobensis* Speg., Anales Mus. Nac. Buenos Aires ser. 3, 4: 513. 1905. *Opuntia arcei* Cárdenas, Cact. Succ. J. (Los Angeles) 28: 113. 1956.

Areolas con espinas notables.

CONCLUSIONES

Basados en los hechos presentados y el conocimiento biológico actual, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- *O. ficus-indica* es el resultado de un largo proceso de selección bajo cultivo. El efecto de este proceso es el desarrollo de poliploidia (hasta formas octoploides) de formas o variedades vigorosas, más convenientes para el uso humano que sus parientes silvestres. La selección de plantas menos espinosas ha conducido a la obtención de plantas sin espinas. El tamaño de fruto y la calidad también fueron influenciados durante la selección, esta empezó mucho antes del arribo de los españoles a México. La hibridación intraespecífica e interespecífica sugiere un origen polifiletico.
- Los nopales cultivados sin espinas fueron introducidos a España, probablemente pocos años después del descubrimiento de América (circa 1500), inicialmente con propósitos ornamentales y como curiosidades en los jardines de la nobleza. Posteriormente



fueron llevados a otros países del Mediterráneo así como a Sudamérica, Sudáfrica, India y Australia. Los navegantes incrementaron su distribución usándolos como hortaliza fresca que los protegía del escorbuto. La razón principal de la diseminación posterior del nopal por los humanos fue la producción de forraje en zonas áridas, el uso de frutos o cladodios para consumo humano, y la producción de cochinilla.

- El nopal fue introducido al cultivo en varios países con clima tropical y árido, diseminándose por medios vegetativos y sexuales, hasta naturalizarse en esas zonas. Este proceso sucedió de forma independiente en más de una ocasión en varios sitios diferentes, en diferentes países, y en casi todos los continentes, en

las regiones donde es nativo así como en las nuevas áreas de distribución. El resultado fue la aparición de nuevos centros de diferenciación infraespecífica, con la emergencia de cultivares, y subsecuentemente de clones naturalizados e híbridos. Las formas naturalizadas desarrollaron diferentes caracteres morfológicos y fisiológicos sutiles comparados con las variedades cultivadas. Las plantas con espinas reversionaron repetidamente de formas sin espinas.

- *O. ficus-indica* es considerada una especie, o un grupo de clones no relacionados entre sí derivados de diferentes progenitores. El área nativa de distribución del taxa ancestral es la región Central de México.



Morfología y anatomía de *Platiopuntia**

Loreto Pratt, Nicolás Franck y Fusa Sudzuki - Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile

* Este capítulo está basado en la versión anterior escrita por la finada Fusa Sudzuki e Incluido en "Agroecología cultivo y usos del nopal" (1995). FAO



INTRODUCCIÓN

Las especies de *Opuntia*, particularmente aquellas que pertenecen al subgénero *Platyopuntia*, han desarrollado adaptaciones anatómicas, morfológicas y fisiológicas para sobrevivir y crecer en ambientes áridos con severo estrés hídrico que limita la sobrevivencia de otras especies vegetales (Beccaro *et al.*, 2015). Este capítulo describe algunas de las adaptaciones anatómicas y morfológicas más importantes presentes en la raíz, tallo y estructuras reproductivas del nopal (*Opuntia ficus-indica*), la *Opuntia* de mayor valor económico.



SISTEMA RADICAL

Las raíces de las cactáceas han recibido poca atención. Difieren de las raíces de otras plantas en que desarrollan características xeromórficas que les permiten sobrevivir periodos prolongados de sequía. Las raíces contribuyen a la tolerancia a sequía de varias formas:

- Restricción de la superficie de raíces y reducción de su permeabilidad al agua - las raíces finas están cubiertas con una capa relativamente impermeable al agua -, y en suelos secos las raíces se desprenden en una capa de abscisión para evitar la pérdida de agua.
- La absorción rápida de pequeñas cantidades de agua suministradas por lluvias ligeras. Debido a la diferenciación rápida de "raicillas de lluvia" que se desarrollan pocas horas después de una llovizna y que desaparecen tan pronto como se seca el suelo, o se manifiesta una reducción en la superficie radicular por la cual fluye el agua.
- Reducción de la transpiración de la parte aérea debido al alto potencial hídrico negativo de la raíz.

Las características anteriormente señaladas significan que estas plantas tolerantes a sequía y ahorradoras de agua poseen alta resistencia hidráulica (Passioura, 1988); la cual a su vez hace decrecer el flujo de agua hacia el tallo.

El nopal posee un sistema radical superficial y carnoso, que se distribuye horizontalmente. La distribución de la raíz depende del tipo de suelo y del manejo del cultivo (Snyman, 2005). Bajo condiciones favorables de suelo se desarrolla una raíz pivotante, que penetra el suelo hasta aproximadamente 30 cm. En condiciones de sequía - comunes en zonas áridas y semiáridas - se desa-

rollan raíces suculentas derivadas de la raíz pivotante, las cuales pueden absorber humedad de mayores profundidades. Sin embargo, en cualquier clase de suelo se observan masas de raíces absorbentes en la capa superficial, hasta una profundidad máxima de 30 cm, estas pueden extenderse de 4 a 8 m. Se ha observado también que las plantas abonadas periódicamente desarrollan raíces suculentas sin ramificaciones, mientras que usualmente desarrollan más raíces laterales que presentan una capa exterior con superficie corchosa y exfoliada (North y Nobel, 1992).

De acuerdo con Snyman (2004, 2005) el sistema radical de *O. ficus-indica* es muy complejo y puede mostrar cuatro clases de raíces:

- **Raíces del esqueleto.** Formadas por un esqueleto primario de raíces con pocas fibras, de 20 a 30 cm de longitud, que pronto incrementan en grosor por el crecimiento secundario para formar el peridermo. Cuando estas raíces se mantienen secas por un tiempo y después se humedecen, se forman raíces absorbentes laterales derivadas de las yemas latentes en apenas unas horas, como respuesta a la disponibilidad de humedad (North *et al.*, 1993; Dubrovsky *et al.*, 1998). La iniciación de las raíces laterales es siempre endógena y de las células del parénquima del floema secundario. La investigación sobre la regularidad de la formación de raíces adventicias de *O. ficus-indica* ha mostrado que las raíces laterales finas derivadas de la raíz pivotante mueren con la edad. El proceso estimula la división celular en los tejidos del parénquima de la raíz y la formación de puntos meristemáticos con raíces adventicias (Gibson y Nobel, 1986). Esta masa de raíces frágiles y finas son formada de raicillas cortas y ramificadas, se cubre completamente de pelos radicales. También de ectomicorizas de diferentes clases, principalmente del tipo vesículo-arbuscular, que crecen y ramifican simultáneamente con las raicillas ramificadas.
- **Raíces absorbentes.** Formadas rápidamente de las yemas laterales a las pocas horas de la llegada de la humedad, Gibson y Nobel (1986) las llamaron "raíces de lluvia". Se desarrollan de yemas latentes ocultas en el córtex de las raíces más viejas. Las raíces de lluvia mueren tan pronto se seca el suelo.
- **Raíces adventicias.** Desarrolladas en haces, de la masa más gruesa de raíces (Boke, 1980). La base de las raíces de este tipo en el nopal, exhiben apéndices en forma de corona y brácteas y contrario a la des-

cripción de Boke, (1980), las raíces se desarrollan de un apéndice o espolón que puede ser de dos tipos; grueso y carnoso con abundantes pelos radicales, o dos o tres raíces largas y delgadas similares a las raíces absorbentes. Se desconoce si las raíces maduras se mueren o maduran con el tiempo.

- **Raíces desarrolladas de las areolas.** Cuando las areolas entran en contacto con el suelo, pueden emitir este tipo de raíces. Al final de su desarrollo, son gruesas y sin pelos radicales, tienen caliptra prominente, con las células epidérmicas formando apéndices bracteados. El crecimiento de las raíces jóvenes es muy rápido, y se transforma en un córtex de 3-4 células de espesor, cubiertas de pelos radicales. Algunas de estas células ante el déficit hídrico reducen la formación de células endodermales con banda de Caspari cerca de la punta de la raíz (De Micco y Arone, 2012).

CLADODIO

El nopal es una planta con metabolismo tipo MAC (Metabolismo del Ácido Crasuláceo), comúnmente considerado resistente a sequía, debido a que almacena cantidades considerables de agua en sus cladodios (Nobel, 1994,1995). La morfología y anatomía de los cladodios ha evolucionado precisamente para servir esta función. De acuerdo con Buxbaum (1965), las Cactáceas están ampliamente caracterizadas por sus yemas aéreas cortas ("areolas", que poseen pelos y espinas), un tallo suculento con córtex verde y ausencia de follaje. Según Hunt y Taylor (1986), las areolas de Opuntioideae además de o en lugar de espinas, desarrollan pelos finos espinosos llamados gloquidios. En *O. ficus-indica* las partes de pseudotallo conocidos como cladodios, son suculentos y de forma típicamente oblonga a espatulada-oblonga, usualmente de 30 40 cm de largo, a veces más largas, (70-80 cm) y de 18 a 25 cm de ancha. Anatómicamente el cladodio en una sección transversal es una eustela, formada por epidermis, córtex, tejido vascular, en un anillo y organizado en grupos de vasos vasculares separados por tejido de parénquima y medula, la cual forma la mayor parte del tejido suculento.

Epidermis

Consiste de una capa de células epidermales y 6-7 capas de células hipodermales, con paredes primarias gruesas parecidas a tejido laminar de colénquima. Las células epidermales son planas, delgadas y arregladas casi como piedras de pavimento. La epidermis e hipodermis provee una barrera efectiva que previene el daño físico y mantiene la integridad mecánica. Las células gruesas de la hipodermis son fuertes y actúan como primera línea de defensa contra hongos, bacterias y lesiones por

pequeños organismos. La epidermis permanece intacta por largo tiempo hasta que eventualmente es reemplazada por corteza (peridermo).

El peridermo está formado por células epidermales, ya sea como parte del proceso de envejecimiento o por tejidos de córtex más profundos, cuando por causas de heridas la piel se rompe y se forma corteza a partir de las células de pared gruesa de la hipodermis y se cae.

La epidermis constituye la capa más exterior de células del cuerpo de los cactus, es una capa protectora continua de células que también poseen estomas (**Figura 1**). La epidermis tiene tres funciones principales:

- regular la entrada de dióxido de carbono - y la salida de oxígeno - de la planta.
- retener el agua dentro del cuerpo de la planta.
- proteger la planta de los hongos, insectos y luz solar intensa (Mauseth, 1984).

La capa más externa de la epidermis está impregnada con cera de una sustancia grasosa llamada cutina. La cutícula del nopal en comparación con la cutícula de la mayoría de las plantas, es relativamente gruesa y la de *O. ficus-indica* puede alcanzar entre 8-20 μm . En términos químicos, la cutina no es un producto puro como la celulosa, sino más bien una mezcla de ácidos grasos que se polimerizan espontáneamente en presencia de oxígeno. La cutina además de resistente al agua, es uno de los compuestos naturales más conocidos (Mauseth, 1984).

Un examen de la superficie de los cladodios del nopal realizado con scanner y microscopio electrónico revela una capa delgada y agregada de placas casi verticales. Esta capa imprime a los cladodios su apariencia blanquecina. De acuerdo con Metcalf y Chalk (1979), la cera epicuticular presente en *O. ficus-indica* corresponde al grupo básico III, clasificado como placas y escamas.

La superficie cerosa y rugosa alrededor de las células epidermales tiene varias funciones. En lo que respecta al equilibrio hídrico, la cutícula previene el escape de vapor de agua de las planta y repele el agua superficial. La cutícula blanca refleja la radiación solar, resultando en una reducción de la temperatura del tallo (Gibson y Nobel, 1986).

De acuerdo con Mauseth (2006a), la epidermis de la mayoría de las cactáceas persiste por décadas como un tejido viviente, transparente y capaz de intercambiar gases. En contraste con la epidermis efímera de las plantas anuales con semilla, la cual dura únicamente mientras la planta vive, o se muere cuando se forma la corteza en el caso de las plantas perennes. La epidermis de un cacto está presente y viva, mientras el color verde este visible en el córtex interno.

El mismo autor menciona que la epidermis esté presente en las cactáceas en forma de capas dobladas, más



que una capa continua y lisa, lo cual afecta la resistencia del tallo y su flexibilidad y capacidad de aumentar de volumen sin agrietarse. La superficie en forma de placa irregular permite que cuando el agua es absorbida y el volumen del tallo aumenta, la base acostillada aumenta sin requerir de un incremento del área superficial. Conforme se incrementa la base de la costilla el córtex interno también se expande. Como resultado existen cambios en volumen - pero no en el área superficial - de los tallos, sin causar daño a la epidermis o hipodermis (Mauseth, 2000).

Los estomas abundan en la epidermis de los tallos de otras cactáceas y se distribuyen regularmente sobre ambos lados de la superficie (Sajeva y Mauseth, 1991). En *O. ficus-indica*, se reparten al azar, no en un gran número, usualmente 15-35 mm², (Mauseth, 1984). Las células guarda no difieren de

do, pero la epidermis del entrenudo no tiene protuberancias. La hipodermis posee varias capas de células, con pared celular extremadamente gruesa y dura (Gibson y Horak, 1978; Mauseth y Ross, 1988; Mauseth, 1996, 1999b; Mauseth y Kiesling, 1997; Terrazas Salgado y Mauseth, 2002; Loza Cornejo y Terrazas, 2003; Terrazas Salgado y Arias, 2003).

Areolas

Las areolas son ovaladas y se ubican a 2mm debajo de la superficie de la epidermis. Bajo condiciones ambientales apropiadas, los cladodios nuevos, las flores o las raíces emergen del tejido meristemático de las areolas. En *O. ficus-indica*, las areolas se distribuyen en una orientación helicoidal, y desarrollan espinas (en vez de hojas como sucede en la mayoría de las plantas). Cuando el cladodio es joven, las areolas se forman en la base de los podarios (cladodio). El podario sostiene una estructura de color verde, pequeña, subulada, de corta vida, la cual pronto se marchita y cae. Esta estructura efímera corresponde a la hoja (**Figura 3**). El podario es prominente en la primera fase de desarrollo del cladodio y se pierde conforme el cladodio envejece. Las areolas se empiezan a formar en la parte baja de la base de este corto meristemo apical, y muy pronto las espinas se desarrollan de la parte basal del meristemo (Mauseth, 1984); el número de espinas varía, pero frecuentemente se encuentran una o dos espinas centrales y una espina más corta lateral. La espina central crece por un periodo más largo que las otras; son más gruesas porque son producidas por primordios más robustos (Gibson y Nobel, 1986) y tienen células elongadas con paredes celulares lignificadas. Cuando crecen también presentan gloquidias.

Espinas y gloquidias

La presencia de espinas es una característica particular de las areolas y su morfología posee significancia taxonómica (Robinson, 1974). Es posible distinguir dos tipos de espinas; espinas y espinas pilosas (gloquidias). De acuerdo a Boke (1944), las gloquidias y las espinas son reconocidas como equivalentes a hojas y las diferencias entre ellas son cuantitativas, ambos tipos son derivados de la túnica y el corpus, tal como los primordios de hoja.

El número y la duración de las espinas y las gloquidias de *O. ficus-indica* dependen de el tipo. Usualmente, las espinas están presentes en la primera etapa de crecimiento del cladodio, y la mayoría de ellas caen cuando incrementa la temperatura, permaneciendo solo ocasionalmente en la base

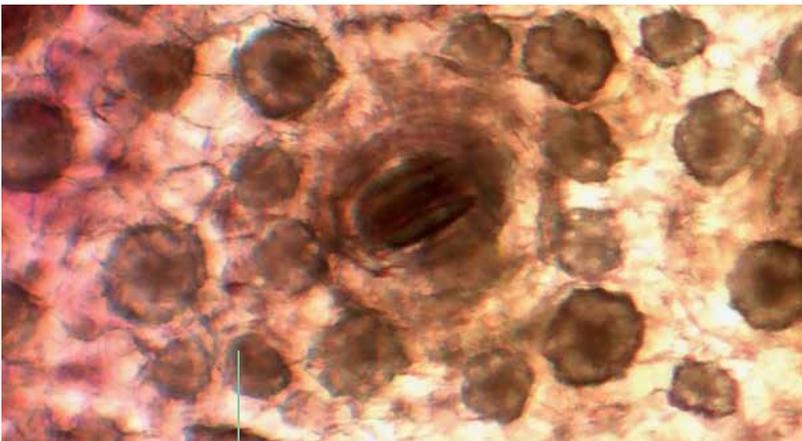


Figura 1

Estomas de la epidermis de un cladodio completamente desarrollado. También se aprecian las drusas en la hipodermis rodeando a los estomas.

otras plantas con flores, usualmente miden alrededor de 40μ y son hundidas, por lo que el poro está escondido en la superficie de la epidermis. Presentan un canal subestomatal prominente, a través del tejido esclerenquimático de la hipodermis, formando un pasadizo para el intercambio gaseoso entre la atmósfera y el tejido fotosintético subyacente a la hipodermis; la cámara endoestomática está en la capa de clorénquima (**Figura 2**). El par de células guardas está rodeado por 3 o 4 hileras de células subsidiarias. La superficie epicuticular ilumina estas células, por lo que los estomas pueden ser observados con poco esfuerzo. Dentro de las células epidermales y la hipodermis se encuentra una capa conspicua de cristales agregados de oxalato de calcio, denominados drusas. (**Figura 2**).

De acuerdo con Mauseth (2006a) las células epidermales de *O. ficus-indica* tienden a ser delgadas, no engrosadas y no lignificadas. La epidermis es frecuentemente más delgada de lo esperado en una xerofita y presenta abundantes tricomas largos, multicelulares y uniseriados en cada nu-

del cladodio por un periodo largo.

De acuerdo a Robinson (1974), es muy fácil distinguir la subfamilia Opuntioidea por la superficie rugosa de las gloquidias y las espinas. En *O. ficus-indica*, las espinas presentan la superficie rugosa y la gloquidias la tienen lisa; las gloquidias están organizadas en grupos de 7 a 12, en las cavidades de las areolas. Las espinas son blancas; una o dos son largas (1.0 a 1.5 cm); acompañadas por dos más pequeñas. Conforme las puntas de las espinas endurecen, el meristemo basal continúa ampliándose. Según Gamong citado por Buxbaum (1950), las espinas son formadas en series. Las gloquidias son pequeñas, cortas y multicelulares; se ha sugerido que las primeras dos espinas son estipulas, donde las células alargadas y lisas (que pueden ser de 14-16) forman una cadena y no se esclerifican. Son de color café e imparten ese color a las areolas. La superficie de los ahuates está cubierta por carbonato de calcio y pectinas (Buxbaum, 1950). Las gloquidias están agrupadas en grupos compactos de 4-6 algunas un poco más largas con apariencia de espinas. Son duras, esclerificadas y puntiagudas; su superficie está cubierta de espinas barbadadas, lo cual les permite alojarse en la piel y no pueden ser removidas fácilmente. Conforme crecen las gloquidias están pegadas a la areola, pero se desarrolla una capa de felógeno en la región cortical exterior alrededor de la base de cada grupo. Como resultado, en el caso del nopal, se convierten en deciduas y son fácilmente removidas por contacto o por el viento. Su función precisa no es clara, pero podrían condensar agua del aire (Buxbaum, 1950). Adicionalmente las espinas ayudan a reducir la temperatura del tallo durante el día, y su presencia disminuye la intercepción de luz por el cladodio.

Córtex

La mayoría de las Opuntioideas tienen un córtex interior grueso, con células en empalizada con clorofila cubriendo un córtex interior de células incoloras o casi incoloras (Mauseth, 2005). Aquellas con cladodios planos laterales no tienen placas en la superficie. En *Opuntia* la hipodermis se ubica debajo del clorénquima, el cual constituye el tejido intermedio entre la hipodermis y el anillo de haces vasculares. El clorénquima de *Opuntia* es grueso y succulento y consiste de un córtex primario, formado por una masa más o menos homogénea de células parenquimatosas. Posee clorofila en la parte exterior y está colocado en hileras radiales largas que forman un clorénquima en empalizada prominente, similar al de las hojas. La parte interior es blanca y esta formada de células parenquimatosas esferoidales, similares a las del mesófilo esponjoso.

Todas las especies de *Opuntia* de cladodios planos tienen canales amplios (660-3000 nm) llenos de células mucilaginosas flotando libremente en el mucilago extracelular, desconectadas de las lamellas internas. Los canales están cubiertos de un epitelio multicapa. Los canales de células mucilaginosas se ubican justo afuera del floema primario, que se hace más amplio conforme las células del epitelio se separan y flotan en el lumen (Mauseth, 1980; 2005). El tejido verde (clorénquima) y el blanco (parénquima) presentan idioblastos, llenos de mucilago o con cristales más pequeños que los de las células epidermales. Mientras que las partes verdes contienen cloroplastos cuya función es la fotosíntesis, el tejido blanco simplemente es un almacén de agua.

El parénquima es una "fábrica química" que produce las hormonas, alcaloides y otros productos formados durante el metabolismo de la planta (Mauseth, 1984; Sajeve y Mauseth, 1991). No posee cloroplastos pero sí otros organelos - amiloplas-



Figura 2
Epidermis con 4-5 capas de células hipodermiales.

Figura 3
Areolas de un cladodio joven mostrando dos espinas, la hoja efímera y varias gloquidias oscuras.

tos- para almacenar almidones. Se compone de tejido parenquimatoso homogéneo, con pequeños espacios intercelulares.

La función precisa del mucilago no es conocida, sin embargo es generalmente aceptado que ayuda a retener agua dentro de la planta. Mauseth, (1980) presenta una explicación detallada del desarrollo de las células mucilaginosas. Empezando con dictiosomas muy activos que producen pequeños sacos o "vesículas" laterales de mucilago, esta substancia mucilaginosa se deposita fuera del citoplasma conforme aumenta su cantidad. Posteriormente, el citoplasma muere y se deterioran los organelos dejando únicamente el mucilago donde antes había una célula viva. Las células mucilaginosas están presentes en todos los tejidos, hipodérmico, cortical, vascular y medular. El mucilago es muy resbaloso, complejo y está formado de carbohidratos no digestibles (Gibson y Nobel, 1986).



Medula

La medula de *O. ficus-indica* esta hecha de células parenquimatosas esferoidales con paredes celulares delgadas, similares a las del córtex interno. La mayoría de las células de la medula cercanas a los haces vasculares contienen numerosos granos esféricos de almidón o mucilago y drusas pequeñas. Sorprendentemente, la zona perimedular (adyacente al protoxilema y rayos medulares) de algunas Opuntioideas consisten de traqueidas bandeadas anchas (Mauseth, 2006b), un tipo de células asociadas al xilema más que un tejido basal como la medula o el córtex.

Tejido vascular

Debajo del córtex, el nopal posee un anillo de haces vasculares laterales con tejido suave entre ellos (eustela) correspondiente al cambium fascicular o rayos medulares. Los haces vasculares están conectados al tejido meristemático de las areolas, formando una red de tejido vascular muy fino y sofisticado de haces accesorios. Como lo menciona Freeman (1970) para *O. basilaris*, la anastomosis de haces de tallo es común y resulta en la formación de un cilindro complejo alrededor de la medula. En cada nudo una red vascular está formada por la fusión de dos simpodia y los relictos de hoja con relictos de areolas y numerosos haces accesorios. Entre estos haces, se encuentran grandes huecos romboidales parenquimatosos, formados por encima del punto en el cual cada traza de hoja diverge de la red vascular hacia la areola.

El xilema es simple, y sus elementos vasculares (de 75 μ de ancho) son más abundantes que los escasos elementos traqueales (40 μ ancho). Los vasos primarios, así como los elementos traqueales del tejido vascular,

están caracterizados por sus engrosamientos anulares helicoidales, con perforaciones escaleriformes o reticulares en las paredes secundarias (Hamilton, 1970). Las células mucilaginosas y los granos esféricos de almidón son abundantes ubicados alrededor de los haces vasculares, Freeman (1969) ha postulado la teoría de que los canales o ductos mucilaginosos no son realmente formados, sino que resultan de la constante degradación lisogénica de las paredes que separan las células mucilaginosas.

Todos los tallos de cactáceas, aun los más aplanados de las Opuntioideas, presentan un anillo sencillo de haces vasculares colaterales (o eustela), típica de todas las plantas con semilla no monocotiledóneas). En las cactáceas estos tejidos vasculares primarios tienen poco o ninguna característica inusuales (Bailey, 1961; Gibson, 1976; Mauseth, 2004).

CORTEZA

Con pocas excepciones el corcho del cambium de los cactus emerge de las células epidérmicas (Mauseth y Ross, 1988; 1989, 1996, 1999a,b; Mauseth y Kiesling, 1997; Terrazas Salgado y Mauseth, 2002). Debido a que el único cambium de corcho es superficial, la corteza de los cactus consiste simplemente de bandas alternas de células de corcho y esclereidas (ambas producidas por el corcho del cambium), nunca contiene la hipodermis, córtex o floema primario o secundario típicos de la corteza de muchas plantas con semilla. El córtex que almacena agua nunca descartado. Las lenticelas parecen estar ausentes (Terrazas *et al.*, 2005).

MADERA

La madera presenta una diversidad tremenda en las Opuntioideas, algunas especies tienen fibras ordinarias de madera, mientras que otras poseen madera con anchas bandas traqueoidales (ABT) (Gibson, 1977; 1978a,b; Mauseth, 2006b). Existen también dos variaciones de ABT en Opuntioidea, dado que en algunos casos las ABT están colocadas en los rayos. La distinción entre las ABT ubicadas en el sistema radial y aquellas del sistema axial no es clara debido a que las ABT ocurren en ambos tejidos. Las regiones axiales están definidas por la presencia de vasos (y elementos cribosos en las regiones correspondientes al xilema secundario) los rayos son áreas sin vasos (y regiones correspondientes de floema secundario sin elementos cribosos). Los rayos ABT pueden ser distintivamente más grandes que los ABT axiales en el mismo tallo. Otra variación en Opuntioidea, los ABT ocurren únicamente en los rayos, y están ausentes en el sistema axial. Los rayos son muy

anchos y consisten de ABT y parénquima. Los sistemas axiales que inicialmente son fusiformes consisten solamente de una o dos hileras de vasos y pocas células del parénquima axial.

YEMAS FLORALES

Las yemas florales de los cactus son las areolas, las cuales se han desarrollado muy temprano en la axila del primordio de hoja. La areola empieza a evolucionar de una masa de células, la cual se transforma rápidamente en un meristemo apical típico con todas las zonas regulares; túnica, células madre centrales, zonas periféricas y meristemo de la costilla de la medula. Las espinas y las gloquidas también se desarrollan en una etapa temprana. Después de un periodo (que puede variar entre corto y largo) el meristemo ubicado al centro de la depresión entra en dormancia. Cuando este se activa nuevamente crece como un brote largo en vez de un brote corto formando una rama con hojas y areolas o produce una especie de brote largo súper modificado, la flor (Pimienta Barrios, 1990).

En la revisión de Reyes Agüero y Valiente Banuet (2006) sobre la biología reproductiva de *Opuntia*, se indica que en contraste con todas las otras cactáceas, el meristemo puede producir un solamente un cladodio o una flor y no se activara nuevamente. Asimismo, el 74% de las flores de *O. ficus-indica* crecen en cladodios de 1 año de edad, mientras que la mayoría de las yemas vegetativas brotan en cladodios de 2 años. *O. ficus-indica* desarrolla 20 o más yemas florales por cladodio, y durante el desarrollo floral, el pericarpio mantiene la actividad fotosintética y el desarrollo areolar de las gloquidas, espinas y hojas. Cuando la yema floral de *O. ficus-indica* alcanza 0.5 cm de largo, el gineceo y el androceo pueden ser distinguidos

bajo el microscopio. Los estambres se diferencian rápidamente hacia un par de anteras, cada una con dos sacos polínicos. El mismo autor menciona que *O. ficus-indica* posee un ovario con muchos carpelos, que varían entre 6 y 12 (usualmente 6), los cuales crecen juntos en la base y se separan en la base de la región estigmática. El ovario unilocular contiene hasta 270 óvulos o primordios de semilla que pesan entre 0.44-3.01 mg. En *O. ficus-indica* la antesis de la flor ocurre antes del mediodía y las flores cierran al atardecer abriendo nuevamente al día siguiente. Antes de la antesis los estambres están agrupados juntos alrededor del estilo, separándose luego. La dehiscencia de las anteras puede ocurrir 12 horas antes o a momento de la floración.

Las flores del nopal son únicas en varias características (**Figura 4**):

- los segmentos del perianto se diferencian levemente de los pétalos.
- los estambres están arreglados en forma de espiral.
- el pistilo cuenta con cuatro o más carpelos, encerrados en la cavidad floral.
- el ovario es unilocular con placentación parietal, embebido aparentemente en el extremo de una rama modificada (Boke, 1980).

Adicionalmente, los cactus son de las pocas plantas en las cuales el exterior del ovario inferior, llamado receptáculo, muestra hojas y areolas perfectas. Esta estructura después se transforma en la cascara del fruto. Conforme la yema emerge es posible ver si es vegetativa o reproductiva observando su volumen y forma. La yema reproductiva es casi esférica (**Figura 5**), mientras que la vegetativa es más bien aplanada.

La proporción de yemas florales a vegetativas es



Figura 4

Sección longitudinal de una flor completamente desarrollada, mostrando el ovario inferior con numerosos óvulos y el cáliz, pétalos, estambres y pistilo

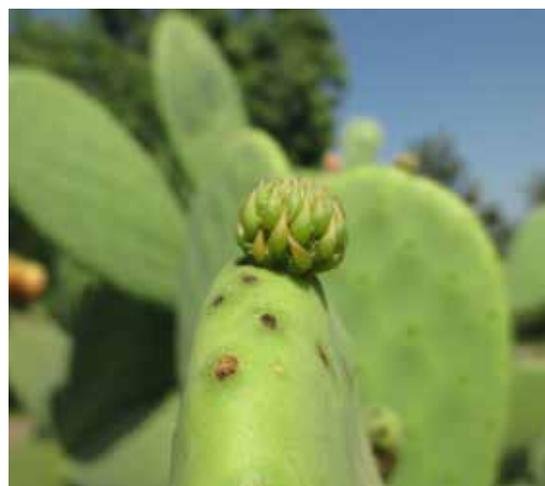


Figura 5

Yema floral en el borde de un cladodio completamente desarrollado

de 3:1, y el 10% de los cladodios pueden tener ambas clases de yema en igual proporción (Sudzuki Hills *et al.*, 1993). Las flores son hermafroditas y actinomorfas. Se desarrollan de la parte superior de los cladodios de 1 o 2 años de edad y ocasionalmente sobre cladodios de 3 años. Ambas clases de yema emergen sobre la superficie del cladodio con la mayor exposición al sol.

La diferenciación floral ocurre en un periodo corto de tiempo, entre 50-60 días después de que el meristemo comienza a activarse, a través de la antesis, en contraste con muchas otras frutas (manzana, pera, etc.) en las cuales la diferenciación floral comienza el año anterior (Pimienta Barrios y Engleman, 1995). La parte estéril de la flor está representada por el perianto y existen pocas diferencias entre los sépalos y los pétalos, aunque los sépalos son más pequeños, ambos son oblongos y fusionados en la base, los pétalos son de color amarillo brillante o rosado. Las flores amarillas cambian de color a naranja o rosado después de ser fecundadas. Los estambres son numerosos y están fijados a la base e insertados en la cavidad del receptáculo en arreglo fasciculado, desarrollándose de manera centrifuga de tal modo que el haz inferior se coloca sobre el pistilo y el superior a la altura del estigma. Los filamentos son libres y las anteras producen gran cantidad de polen seco, el cual se libera antes que los óvulos (protandria).

De acuerdo con Pimienta Barrios (1990), las anteras tienen movimiento tigmotropico. Al comienzo de la antesis los estambres se encuentran cerca del estilo y las anteras en contacto con la base del pistilo. Este proceso es conocido como cleistogamia, y la protandria de las flores explica la naturaleza autogámica de *O. ficus-indica* (Rosas y Pimienta, 1986). La polinización es entomófila cuando la flor está abierta, el estigma está colocado sobre los estambres (Pimienta Barrios, 1990).

El pistilo posee una sección amplia en la base, prominentemente seccionada, y un estigma granular y viscoso formado por diez septos y configurado como una antera. El ovario es sincárpico, unilocular, formado de cinco carpelos y presenta placentación parietal.

En *Opuntia*, el funículo es delgado y relativamente largo, los óvulos poseen integumentos verdaderos (Archibald, 1935) con el interno más lejano que el externo. El tercer integumento es la parte modificada de uno de los dos integumentos normales y rodea al ovulo completamente (Eames, 1961). Los óvulos son circinotropos, mientras que el funículo rodea al ovulo y cubre al micrópilo con un tercer integumento grueso. Es posible observar esta estructura en las semillas de *O. ficus-indica*, donde está presente con el poro micropilar completamente libre.

La superficie interior del funículo está cubierta de pelos cortos - papillae - especialmente en el punto donde el funículo toca el micrópilo. Los óvulos están colocados en dos hileras uno en cada de las suturas ventrales promi-

entes. La ubicación sugiere que la unión del carpelo es margen con margen y que los haces dorsales se extienden hacia los óvulos.

GRANO DE POLEN

El grano de polen presenta una capa exterior gruesa, la exina, la cual tiene una función protectora. Su volumen cambia dependiendo del nivel de humedad (Eames, 1961). La capa interna es la intina, esta es delgada y se adapta rápidamente a los cambios en tamaño. Los diseños de la exina tienen considerable valor taxonómico y filogenético, mientras que la pared puede convertirse en una estructura gruesa y compleja y la capa exterior se muestra esculpida con costillas prominentes, espinas y gránulos. En *Opuntia* los granos de polen son esferoidales, reticulados y policolpados; pueden tener hasta 18 colpos - i.e. similar al grano de polen de *O. ficus-indica* descrito por Scheinvar (1955), el cual tenía 2 colpos. Existe un gran número de granos de polen y es posible observar túbulos de granos germinados sobre la superficie glandular epidermal del amplio canal estilar 24 horas después de la antesis. La fecundación de los óvulos empieza gradualmente 48 h después de la antesis y continúa por 10 días más. Este patrón de fertilización fue denominado como "progámico". El número promedio de óvulos fecundados por flor depende del cultivar (Rosas y Pimienta Barrios (1986). La poliembriónia de origen nucelar es común en *Opuntia*. Esto explica el desarrollo de dos o tres plántulas de una sola semilla. Archibald (1935) reportó que la poliembriónia nucelar, con el desarrollo del endospermo y sin fertilización ocurre en *O. ficus-indica* y otros cactus.

FRUTO

El fruto de *O. ficus-indica* es una baya carnosa simple formada por un ovario inferior hundido en el tejido del tallo del receptáculo. La cascara se origina en el receptáculo y presenta la misma morfología del cladodio:

- Epidermis con hojas efímeras y areolas perfectas, con gloquidias más o menos permanentes en los cladodios.
- Hipodermis esbelta y córtex voluminoso.
- Abundantes células mucilaginosas, pero no cristales.

La **pulpa** está formada del crecimiento exterior de los tricomas que se originan en las células epidermales del funículo y la envoltura funicular (Pimienta y Engleman, 1985). El tamaño del fruto depende del número de óvulos fecundados y del número de semillas que abortan (Archibald, 1935; Pimienta Barrios, 1990; Barbera *et al.*, 1994). Todavía no se conoce porque las semillas abortan.



Las **frutas** frecuentemente tienen dos clases de semillas estériles, una de las cuales predomina. La falta de viabilidad de las semillas está relacionada con la absorción del ovulo o del embrión adventicio joven (Archibald, 1935). En este último caso, la nucela continua su crecimiento, aun después de que el embrión está formado, y al mismo tiempo que el funículo es formado, este cambia hacia una cubierta lignificada dura. En Chile, muchos frutos de *O. ficus-indica* han revelado una tercera clase de semillas no viables. Es una forma anómala, posiblemente también resultante de la transformación del funículo en una cubierta dura, pero con el desarrollo activo de la nucela, la cual eventualmente emerge a través del poro micropilar que no fue bloqueado por el ovulo. En las variedades de nopal, la presencia de un alto número de semillas normales en el fruto es considerado un obstáculo para la comercialización. Las variedades italianas tienen en promedio 273 semillas, de las cuales 146 son normales y 127 estériles. Los cultivares israelíes presentan un promedio de 268 semillas normales por fruta mientras que los cultivares mexicanos poseen 203 semillas normales por fruto (Reyes Agüero y Valiente Banuet, 2006).

El **diámetro ecuatorial** es el que mejor representa el peso fresco y seco de la fruta. Las comparaciones entre el desarrollo de la cascara y la porción comestible revelan que el crecimiento de la cascara es mayor durante las primeras semanas después de la floración, mientras que la porción comestible empieza a expandirse más en las últimas 5-6 semanas antes de la maduración. De acuerdo a la revisión de Reyes Agüero y Valiente Banuet (2006) sobre la biología reproductiva de *Opuntia*, el fruto de *O. ficus-indica* crece vigorosamente en términos de longitud, anchura, peso y volumen en los primeros 20-30 días después de la antesis, y se detiene aproximadamente durante 20-30 días después de la antesis. La cascara crece más rápido durante la fase 1 del crecimiento del fruto, la semilla tiene el máximo crecimiento en la fase 2 y el máximo crecimiento de la pulpa ocurre durante las fases 2 y 3. El peso del fruto es afectado por el orden de producción de las yemas florales y el número de frutos en el cladodio. Así, las yemas florales que emergen más temprano se transforman en los frutos más pesados. Adicionalmente, los frutos más pesados son obtenidos de cladodios que presentan únicamente seis frutos.





Ecofisiología y biología reproductiva de los nopales cultivados

Paolo Inglese^a, Giorgia Liguori^a y Erick de la Barrera^b

^a Departamento de Ciencias Agrícolas y Forestales, Universidad de Palermo, Italia

^b Instituto de Investigación en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México



INTRODUCCIÓN

El nopal - *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. - es una planta con metabolismo MAC (Metabolismo del Ácido Crasuláceo), cultivada en un amplio rango de ambientes, que resultan en grandes diferencias en sobrevivencia de las plantas, desarrollo y potencial como cultivo. El éxito ecológico de las Opuntias, específicamente el nopal es atribuido principalmente a su peculiar patrón diario de fijación de carbono y pérdida de agua, las cuales ocurren principalmente en la noche. Similar a otras plantas MAC, el nopal abre sus estomas en la noche para fijar CO₂, acumular y almacenar malato en las vacuolas del cloroplasto celular. Dado que las temperaturas nocturnas son más bajas que las diurnas, y la humedad relativa es generalmente más alta, la transpiración de las plantas MAC es de tres a cinco veces menor que las de una planta C₃ y una C₄, respectivamente (Nobel, 1986). El resultado es un tremendo incremento en la eficiencia de uso del agua y en la habilidad de la planta para sobrevivir en ambientes semiáridos caracterizados por una disponibilidad restringida de agua (200-300 mm de lluvia anual) o donde ocurran largos periodos de sequía y altas temperaturas. Aunque la entrada de CO₂, y la acumulación de ácido ocurren durante la noche, estas son fuertemente influenciadas por variables ambientales tales como temperatura del aire, luz, estado hídrico de la planta, nutrientes y salinidad del suelo (Nobel, 1988). De hecho, en el área nativa del nopal en la Altiplanicie Central de México (altitud 1800-2200 msnm), la lluvia es menor a 500 mm, la temperatura media anual varía entre 16 y 18° C, y la temperatura máxima durante el día en el mes más caliente no excede 35°C (Pimienta Barrios, 1990).

En las planicies mexicanas, la estación seca coincide con el invierno frío, mientras que la estación caliente - cuando ocurre el crecimiento de la fruta y la planta - es muy húmedo y lluvioso, exactamente lo opuesto a la cuenca del Mediterráneo, donde la estación seca coincide con los días más calientes, cuando ocurre el crecimiento vegetativo y del fruto (Inglese *et al.*, 2002b). En Sicilia, donde se cultiva el nopal tunero, la lluvia anual alcanza alrededor de 500 mm y la temperatura media anual oscila entre 15 y 18° C, con pico máximo de 37°C en agosto, durante el periodo de desarrollo del fruto (Inglese, 1995). El nopal está presente de manera extensiva en el norte de África (Monjauze y Le Houèrou, 1965a), las tierras altas (2000-2500 msnm) de Tigray, Etiopía y en Sudáfrica. En contraste, está ausente regiones con lluvia

<35 mm y temperaturas máximas de >42°C, tales como el cinturón del Sahel, el Desierto de Mojave en California, o el Desierto de Rajasthan en la India (Felker e Inglese, 2003). Le Houèrou, (2002) describió las plantaciones de Aziza (Libia) donde la temperatura máxima puede exceder 50°C. Los cladodios de *O. ficus-indica* no sobreviven temperaturas de 70°C (Nobel, 2002).

Las frutas de *O. ficus-indica* pueden ser cosechadas de julio a noviembre en el hemisferio norte - La cuenca del Mediterránea, California y México - Y de enero a abril en el Hemisferio Sur dependiendo del genotipo y de la interacción genotipo x ambiente. La refluoración natural o inducida puede extender el periodo de maduración a enero-febrero en el hemisferio norte y de septiembre a octubre en el hemisferio sur. En Salinas California se ha reportado floración casi continua (Bunch, 1996), resultando en un periodo mas prolongado de maduración.

CICLO MAC

Originalmente atribuido a las plantas de la familia Crasulacea, el MAC representa un mecanismo de concentración de CO₂, que ha evolucionado en respuesta a la sequedad de los ambientes terrestres y a la deficiencia de carbono inorgánico en ambientes acuáticos (Keeley, 1998).

El MAC ocurre en 16 000 especies (6-7% de las especies vegetales) que pertenecen a 300 géneros de aproximadamente 40 familias, que varían desde plantas de la selva tropical a las platiopuntias del desierto y cactus columnares. La vasta mayoría de plantas usando el MAC son angiospermas. La mayoría de ellas son epifitas (e.g. orquídeas, bromelias) o xerofitas suculentas (e.g. nopal, y *Euforbias cactoides*); pero el MAC también está presente en litofitas, bromeliaceas terrestres, la halofita *Mesembryanthemum crystallinum*, una planta terrestre no suculenta (*Dodonaea viscosa*) y un manglar asociado (*Sesuvium portulacastrum*).

Características del MAC y suculencia

- Separación temporal y espacial de la entrada de CO₂ y la descarboxilación.
- Reducción de la transpiración debido a la apertura nocturna de los estomas - los órganos de almacenamiento de agua contienen 90-95% de agua comparados con 40-70% de la madera no las no plantas no suculentas.

- Reducción de la pérdida de agua - las plantas MAC pierden 20-30% de la pérdida de agua de las plantas C₃ o C₄ durante la apertura de estomas asociada a la entrada diurna de CO₂.
- Baja proporción de raíz: parte aérea y crecimiento más rápido durante temporada húmeda.
- Suberización de las células corticales, con la formación de espacios suelo-raíz durante la fase de secado del suelo.
- Reciclado interno del agua del parénquima al clorénquima - manteniendo la turgencia del tejido fotosintético sobre un amplio rango de contenidos de humedad.
- Suministro de agua y solutos al fruto a través del floema (la presión osmótica del floema es relativamente baja: 0.94 MPa (2-3 veces menor que la mayoría de las plantas vasculares).

Una descripción breve del MAC se presenta en la (Figura 1):

- **Fase 1.** Durante la noche ocurre la fijación de CO₂ cuando están los estomas abiertos y el CO₂ se difunde hacia los espacios intracelulares y luego hacia el citosol, donde se une al fosfoenolpiruvato (PEP) un compuesto de 3 carbonos a través de la PEP carboxilasa. Esta enzima cataliza la formación de oxalacetato, el cual puede ser transformado en malato por la NAD⁺ malato deshidrogenasa. Para evitar la inhibición, el malato es transportado activamente del citosol a la vacuola, donde es convertido en ácido málico, provocando un incremento significativo en

la acidez. Las vacuolas de las células del clorénquima ocupan más del 90% del volumen celular debido a la acumulación nocturna de ácidos orgánicos.

- **Fase 2.** En la mañana temprano tiene lugar la transición de PEPC hacia la actividad de Rubisco.
- **Fase 3.** Durante el día, la planta cierra sus células guarda, los estomas permanecen bien cerrados y el pH de la vacuola aumenta. El malato se difunde hacia afuera de la vacuola y es descarboxilado. El CO₂ es liberado (incrementando de 0.2 a 2.5%) en el citosol, y es fijado en el ciclo de Calvin en el cloroplasto por la ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa (Rubisco) conduciendo a la síntesis de almidón y otros glucanos.
- **Fase 4.** Al final de la tarde, la PEPC se activa. Bajo condiciones ambientales secas, esta puede ser la única fase de le ciclo MAC que sucede.

Las mediciones de intercambio de gas en *O. ficus-indica* comenzaron a principios de los ochentas, cuando Nobel y Hartsock (1983) midieron el ingreso de CO₂ en cladodios individuales. La temperatura optima y la radiación interceptada, los valores instantáneos de ingreso neto de CO₂ por cladodios individuales de 1 año de edad puede alcanzar 18 μmol m⁻²s⁻¹, con un ingreso total diario de CO₂ de 680 mmol m⁻² (Nobel y Bobich, 2002). Sin embargo, aunque las determinaciones de fotosíntesis neta de los cladodios individuales (Pn) son útiles para estimar la tasa de intercambio de gas

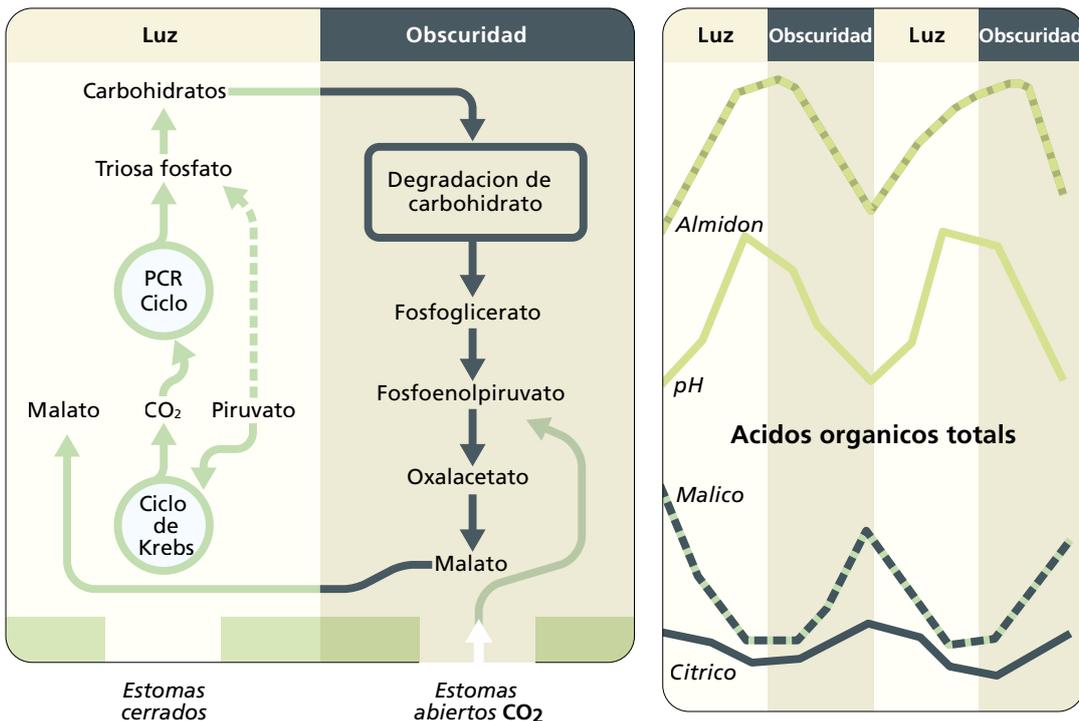


Figura 1 Metabolismo del ácido crasuláceo (CAM).

por unidad de área, tienen limitaciones para escalar a nivel del intercambio de la copa de la planta completa, debido a puede haber amplia variación en la asimilación de carbono dentro de la copa, a causa de las diferencias en la edad de cladodios (Samish y Ellern, 1975), radiación interceptada (Nobel, 1988), carga de fruta (Inglese *et al.*, 1994b), relación fuente-demanda (Pimienta Barrios *et al.*, 2005) y respuesta a estrés abiótico (Nobel y Bobich, 2002).

Existen pocos datos disponibles sobre la absorción neta de CO₂ de acuerdo a la edad del cladodio. Samish y Ellern (1975) notaron que la acidez titulable disminuye linealmente con el incremento de la edad, y que cladodios de 1 año pueden presentar un nivel de acidez tres veces más alto que los cladodios de dos años, ubicados en posición basipétala. Existe la hipótesis de la translocación de carbono de cladodios de dos años para llenar la demanda de fotoasimilados por cladodios de 1 año con frutos (Inglese *et al.*, 1994b; De la Barrera y Nobel, 2004), y la partición del carbono entre cladodios madre e hijos dependen de la etapa del desarrollo del cladodio y las condiciones ambientales (sombreado, disponibilidad de agua) (Luo y Nobel, 1993, Pimienta Barrios *et al.*, 2005) la entrada de CO₂ de cladodios de 2 años durante la temporada puede ser 40% menor que para cladodios de 1 año (Liguori *et al.*, 2013a).

Estadísticas relacionadas con el CAM

- *O. ficus-indica* puede asimilar 344-680 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ de CO₂ (C=35 %).
- Los valores máximos instantáneos de absorción de CO₂ por cladodios = 18 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ seg}^{-1}$.
- Los frutos de 2 semanas después de la floración pue-

den alcanzar una absorción neta de CO₂ de 42 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, i.e. 20% de los cladodios en el mismo lugar y la misma fecha del año.

- Las plantas MAC presentan 10-30 estomas por mm^{-2} vs. 100-300 estomas mm^{-2} en las plantas C3-2.
- La proporción raíz:parte aérea varía de 0.12 (Nobel, 1988) a 0.09 (Inglese *et al.* 2012) y 0.20 (Inglese *et al.*, 2012) en plantas maduras con riego.
- El grosor de la capa de cera de la epidermis es de 10-50 μm vs. 0.2-2 en las hojas de plantas C₃ o C₄.
- El clorénquima de *O. ficus-indica* puede perder reversiblemente el 70% de su contenido de agua a turgencia completa, y el parénquima puede perder 82%, ambos son capaces de recuperarse.
- Después de un periodo de sequía de 15 semanas, el parénquima pierde 60% de su contenido de agua y el clorénquima 25% (Goldstein *et al.*, 1991).

Soleado mejor que nublado

- Absorción de luz y CO₂ están opuestos en el tiempo y la apertura de los estomas depende de valores de PPF diarios en vez de instantáneos.
- El punto de compensación de PPF = 3 moles $\text{m}^{-2} \text{ día}^{-1}$.
- El punto de saturación a PPF = 22 moles $\text{m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, la entrada de CO₂ es al 90% de su máximo.

APTITUD DEL SUELO PARA EL CULTIVO DE NOPAL

El nopal crece en cualquier tipo de suelo. Frecuentemente se adapta aun a suelos limitados por capas duras en los primeros 25 cm, generalmente sobre materiales

TABLA 1 Características funcionales y clases de suelo con aptitud para el cultivo de nopal

Características funcionales		Clases			
		S1 muy apta	S2 apta	S3 menos apta	N no apta
Temperatura mínima	°C	> 3	> 3	> -3; < 3	< -5
Temperatura promedio	°C	18-23	15-18	10-15	< 10
Lluvia anual	mm	> 400	> 400	200-400	< 100
Textura		Arenosa a franca		Arcillo-limosa	Arcillo limosa
Esqueleto		Indiferente	Indiferente	Indiferente	abundante
Profundidad		Indiferente	Indiferente	Indiferente	Indiferente
Carbonatos		Indiferente	Indiferente	Indiferente	Indiferente
Reacción	pH _{KCl}	5-8	5-8	5-8	< 5; > 8
Materia orgánica	%	< 0.5	< 0.5	> 0.5	> 0.5
Calcio disponible		elevado	elevado	medio	insuficiente
K disponible		elevado	elevado	medio	insuficiente
EC _e ^a	dS m ⁻¹	< 2	2-4	4-7	> 7
Agua subsuperficial		ausente	ausente	ausente	presente

^aEC_e = conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo



con contenidos de carbonato de calcio >40% o que contienen < 10% de su peso de suelo fino (Nobel, 2002). Generalmente, *O. ficus-indica* es muy versátil, pero no le favorece la salinidad alta o los suelos inundables, dado que las raíces son muy sensibles a anoxia (**Tabla 1**). Para la producción de nopal el valor límite de la concentración de sal en la solución del suelo es de 50 mol m⁻³ (1.76 ppt NaCl) la cual reduce el crecimiento hasta 40%, comparado con testigo sin sales, mientras que una concentración de 100 mol m⁻³ (5.85 ppt NaCl) reduce el crecimiento en 93% (Gersani *et al.*, 1993). Tolerancia bien alta porosidad (alta en cuanto a textura o macroporosidad estructural) y contenidos modestos o bajos de materia orgánica. En relación a los requerimientos edáficos, la amplia disponibilidad de calcio y potasio es ventajosa para obtener buena cosecha.

ABSORCIÓN DE CO₂ Y DISPONIBILIDAD DE AGUA

La eficiencia de uso del agua (EUA) de *O. ficus-indica* alcanza valores aproximados de 3.3-4.0 g de materia seca (MS) kg⁻¹ de agua (De Kock, 1980; Le Houerou, 2002). En cladodios jóvenes el agua se mueve inicialmente a través del floema, mientras que la absorción xilemática empieza un mes después de su aparición (Wang *et al.*, 1997). La transición de demanda a fuente es también acompañada por una inversión de la diferencia del potencial de agua entre los cladodios jóvenes y cladodios madre. Específicamente, el potencial de agua es inicialmente alto en los cladodios más jóvenes que en los cladodios madre, se hace más bajo en los cladodios jóvenes después de cuatro semanas de crecimiento (Luo y Nobel, 1993; Wang *et al.*, 1997). La succulencia del cladodio actúa como amortiguador para mantener la turgencia en el tejido fotosintético (clorénquima), haciendo posible que el cladodio continúe fotosintetizando durante periodos secos.

Los periodos largos de sequía tienen varios efectos fisiológicos en el nopal. Bajo condiciones óptimas (25/15°C día/noche) y con saturación de luz, *O. ficus indica* puede asimilar 3.44 g m⁻² de CO₂; Nobel y Harsock (1984) mostraron que se requerían 3 semanas de sequía para reducir a la mitad la absorción de CO₂ de un cladodio individual sobre periodo de 24 horas, después de 50 días de sequía, la absorción neta de CO₂ se aproxima a cero (Acevedo *et al.*, 1983). Asimismo, 3 meses de sequía reducen la acumulación nocturna de ácido en 73%, esencialmente por el bloqueo de la transpiración, lo que conduce a una reducción del peso fresco (PF) del parénquima igual a 61%, mientras que el clorénquima pierde únicamente 27% de agua (Acevedo *et al.*, 1983; Goldstein *et al.*, 1991). Las temperaturas óptimas para la absorción nocturna de CO₂ se reducen si las plantas están sometidas a condiciones de sequía (Nobel y Harsock, 1984), especialmente cuando el déficit de agua

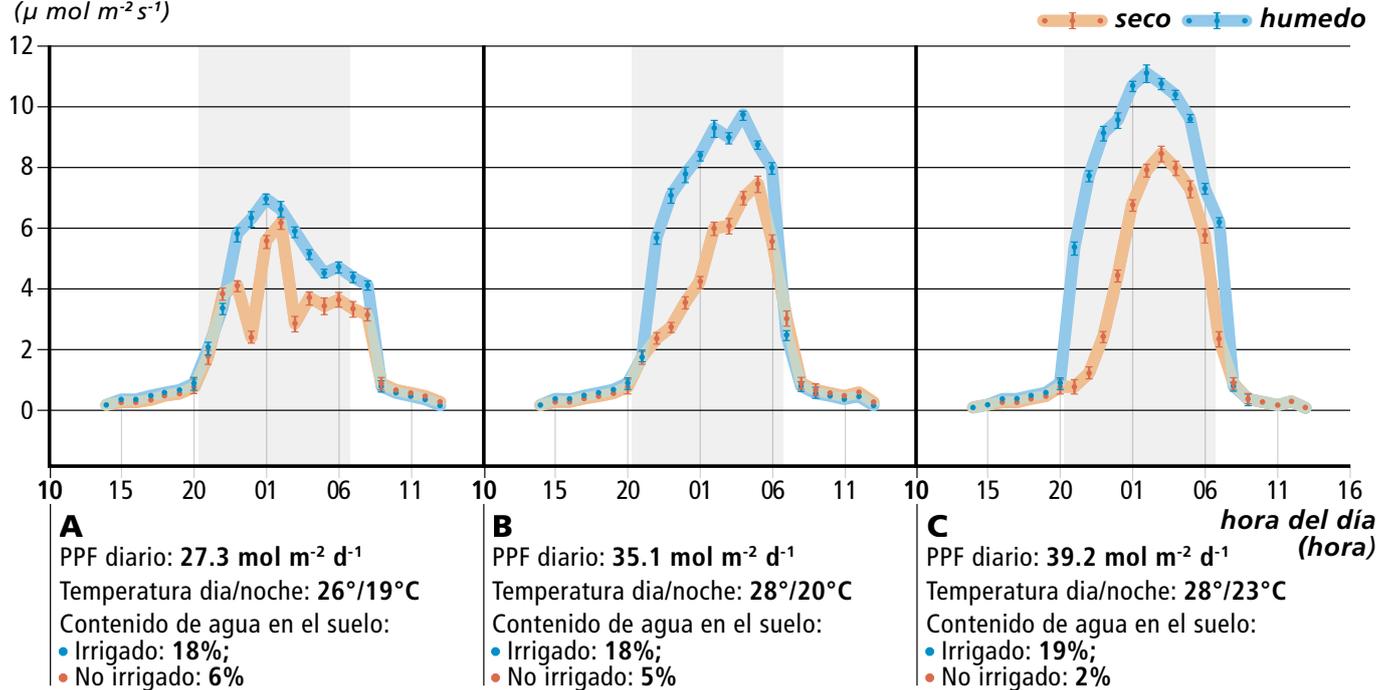
es prolongado (Nobel, 2001). Después de una sequía prolongada, el contenido relativo de agua, el grosor del cladodio (parénquima), el grosor y contenido de clorofila de cladodios individuales declina rápidamente (Pimienta Barrios *et al.*, 2007). En condiciones de estrés hídrico, el parénquima es casi indistinguible del clorénquima que lo rodea (Barcikowski y Nobel, 1984; Liguori *et al.*, 2013a). La habilidad del tejido del parénquima para almacenar y transferir agua al clorénquima provee, bajo condiciones de estrés hídrico, un efecto "amortiguador" eficiente en respuesta a diferentes necesidades fisiológicas (Nobel, 2002). La presión osmótica del parénquima y clorénquima es poco afectada después de 3 meses de sequía, mientras que la presión de turgencia se reduce en 86% comparada con la condición de riego (Goldstein *et al.*, 1991).

Las fluctuaciones Diel en el grosor del cladodio pueden también representar indicaciones tempranas de estrés por deshidratación. Los cladodios jóvenes muestran valores Diel más pronunciados que los cladodios más viejos y por lo tanto pueden servir como un modelo aceptable para evaluar la respuesta de la planta a factores ambientales. Bajo condiciones de riego suficiente, las fluctuaciones Diel del grosor del cladodio están directamente relacionadas con variaciones de la temperatura, pero no bajo condiciones de estrés por sequía severo (Scalisi *et al.*, 2015). Adicionalmente el crecimiento del cladodio es extremadamente sensible a la rehidratación después de periodos largos de sequía, sugiriendo que la reducción regulada del riego podría no ser afectar significativamente la biomasa de la planta.

Sorprendentemente, las mediciones que integran el intercambio de gases a nivel de planta completa, prueban que la planta de *O. ficus-indica* continua la actividad fotosintética hasta 60 días después del riego cuando el contenido de agua en el suelo es <5% (**Figura 2**). En esta etapa, los cladodios generados en el mismo año y los de 1 año de las plantas no irrigadas se han tornado flácidos, pero la entrada neta de CO₂ de la planta completa todavía mantiene la misma tasa que al inicio del experimento, mientras que durante la estación, las plantas bien regadas han duplicado su absorción neta de CO₂. Eventualmente, la absorción neta de CO₂ de la planta completa, que integra cladodios de diferente edad y capacidad fotosintética, está muy debajo de los valores medidos en cladodios individuales mantenidos en condiciones similares (húmedas o secas) (Nobel y Bobich, 2002; Pimienta Barrios *et al.*, 2005) - un indicador de las diferentes contribuciones de los cladodios individuales a la fotosíntesis de la planta completa-. La capacidad de las plantas de *O. ficus-indica* para mantener su capacidad fotosintética, aun cuando hayan perdido la mayor parte del agua del parénquima, esta probablemente relacionada con el movimiento del agua (de los cladodios madre a los hijos) y la transferencia de agua entre tejidos (del parénquima al clorénquima) resultando en una pérdida reducida de agua del tejido



Absorción neta de CO₂ ($\mu\text{ mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$)



Mediciones realizadas en cámaras abiertas conteniendo tres plants individuales para cada tratamiento (seco y humedo) (a: Junio, b) Julio, c: Agosto). Los puntos sobre las barras coinciden con la duración del periodo nocturno.

Figura 2
Absorción neta diaria de CO₂ en plantas de nopal con riego y sin riego cultivados en maceta.

fotosintético (Barcikowski y Nobel 1984; Nobel, 2006). De acuerdo con Goldstein *et al.*, (1991) y Nerd y Nobel (1991), después de un periodo de 15 semanas de sequía, el contenido de agua de cladodios madre decrece alrededor del 60% y el parénquima almacenador de agua pierde una fracción más grande de agua (65%) que el clorénquima (27%), lo que muy probablemente ayuda a mantener la acumulación nocturna de ácido en el tejido del clorénquima. El clorénquima de *O. ficus-indica* puede tolerar una pérdida reversible del 70% de su contenido de agua en turgencia completa, mientras que el tejido almacenador del parénquima puede perder 82% (Andrade *et al.*, 2009). De hecho cuando ocurre una lluvia después de un largo periodo de sequía, los cladodios rehidratados muestran recuperación completa en términos de peso seco y fresco y de la tendencia de la tasa de intercambio de gases (Pimienta Barrios *et al.*, 2005).

En cladodios bien regados el carbono acumulado en ausencia de fruto, es fraccionado en el parénquima de los cladodios de 1 y 2 años y los cladodios en crecimiento. Por otro lado, la materia seca acumulada durante el periodo de sequía es posible que se destine a cladodios más viejos y al sistema de raíces, el cual es el responsable de la recuperación de la planta después de un periodo largo de sequía (Nobel, 1988). Las raíces de las plantas de nopal de 18 meses sin riego incorporan 23% más carbono de los cladodios basales que aquellas de plantas bien regadas (Luo y Nobel,

1993). La transición de la partición de carbono en favor de las raíces contribuye a la resistencia a sequía en plantas perennes y árboles leñosos y facilita su recuperación después de largos periodos de estrés hídrico (Da Costa y Huang, 2009; Faust, 1989). Adicionalmente, el contenido de sólidos solubles decrece con la sequía, efecto asociado a un incremento equivalente en polisacáridos, presumiblemente almidón, en el parénquima almacenador de agua, pero no en el clorénquima (Nerd y Nobel, 1991).

En regiones muy secas (<30-50 mm) donde no llueve durante el desarrollo del fruto o donde la lluvia anual es <300mm (Gugliuzza *et al.*, 2002a), *O. ficus-indica* requiere de riego suplementario para obtener rendimientos adecuados y buena calidad de fruta (>120 g de peso fresco) (Barbera, 1984; Gugliuzza *et al.*, 2002a; Van der Merwe *et al.*, 1997). El tamaño de fruta se reduce por el déficit de agua desde antes que la planta muestre cualquier síntoma de estrés hídrico (Gugliuzza *et al.*, 2002a). De hecho, la planta es capaz de reciclar el agua interna y el suministro de agua al fruto a través del floema (Nobel, 2002). Nerd *et al.*, (1989) reportaron que en el Desierto del Negev, donde la lluvia anual es <300 mm, la irrigación durante el invierno regula la fertilidad de la planta y la época de brotación en primavera. Sin embargo, los efectos de las temperaturas muy altas no puede ser contrarrestado con riego únicamente, estas afectan la tasa de intercambio de carbono más que la transpiración y siempre resultan en

reducción del crecimiento del fruto y avance en la maduración del fruto, aun con riego. Consoli *et al.*, (2013) reporta que en áreas que no reciben lluvia en el verano (Junio-Septiembre) y con lluvia anual <500 los valores de Kc fluctúan entre (0.45-0.50).

RESPUESTA A LA TEMPERATURA

Seco pero no muy caliente; esta podría ser la sugerencia para *O. ficus-indica*. El metabolismo CAM permite a la planta alcanzar la máxima productividad fotosintética con temperaturas diurnas de 25°C y nocturnas de 15°C. Temperaturas diurnas o nocturnas más altas inducen una fuerte reducción de la asimilación de carbono, que se asocia con crecimiento pobre de la planta y reducción de la producción (Nobel, 2002), y eventualmente bajo valor de la cosecha.

Las temperaturas >30°C causan reducciones de alrededor de 70% de la actividad fotosintética cuando ocurren durante la etapa inicial del crecimiento del fruto; pueden también acortar la tercera etapa del crecimiento del fruto, cuando ocurre el mayor crecimiento de la porción comestible, conduciendo a una madurez anticipada y reducción en el tamaño del fruto, la firmeza y el contenido de azúcares. Las temperaturas altas durante el desarrollo del fruto aumentan la sensibilidad del fruto a las bajas temperaturas (<8°C) durante el almacenamiento postcosecha (Inglese *et al.*, 2002b). Por otro lado, las temperaturas diarias <15°C retrasan el crecimiento y madurez del fruto y provocan que la cascara sea más gruesa, menor contenido de sólidos solubles y color deficiente de la cascara (Inglese *et al.*, 1995; Liguori *et al.*, 2006; Nerd *et al.*, 1991a). Las temperaturas <0°C aun por 4 horas, provocan daños irreversibles al tejido de los cladodios y del fruto. Las temperaturas altas son una limitante importante para la producción de frutos de alta calidad en áreas con veranos secos y calientes. De hecho, la temperatura diaria óptima para absorción de CO₂ disminuye de 17°C en condiciones húmedas a 14°C después de 7 semanas de sequía (Nobel, 2002). El número de días requerido para alcanzar la madurez comercial cambia con el tiempo de floración y las temperaturas prevalecientes durante el periodo de desarrollo del fruto, pero la acumulación de temperatura medida en términos de grados-hora-crecimiento (GDH) de la floración a la cosecha no cambia (40-43 x 103) (Inglese *et al.*, 1999; Liguori *et al.*, 2006). Nerd y Mizrahi (1995 a) encontraron que en cladodios individuales sometidos a temperaturas invernales producen la mayoría de las yemas florales en la primavera siguiente. Resultados similares fueron reportados por Guterman (1995), quien experimento 18 combinaciones de luz/temperatura en cladodios individuales, encontrando que producen significativamente más fruta exponiéndolos a 8 horas de luz y cultivados en el exterior que con 8 horas de luz artificial en el invernadero con calefacción. Nobel y Castañeda (1998) reportaron un incremento de pro-

ducción de frutos de cladodios individuales sometidos a temperaturas de 15/5°C (día/noche) comparados con cladodios expuestos a 25/15°C.

Poitgieter y Smith (2006) reportaron una fuerte influencia ambiental sobre el rendimiento de fruta, observándose el más alto rendimiento de fruta en áreas de Sudáfrica con veranos calientes e inviernos frescos. También observaron que existe una fuerte interacción genotipo por ambiente, indicando una variación en la plasticidad de los cultivares en términos del requerimiento de temperatura para la producción óptima de fruta. Sin embargo, el nopal tunero produce fruta en el Valle de Catamarca, al noroeste de Argentina y en las Islas Canarias, donde se acumulan no más 100 unidades frío en el invierno; asimismo la planta es capaz de florecer varias veces en la misma estación - de manera natural en el caso de Chile o California, y de manera artificial en el caso de Italia e Israel, (Inglese, 1995); Liguori *et al.*, 2006). Esta floración fuera de temporada parece no tener relación con la endodormancia, el periodo de descanso podría resultar de la ecodormancia más que una dormancia verdadera o endodormancia. En Sicilia y con *O. ficus-indica*, un segundo flujo de frutos puede ser colectado después del primero obtenido de flores y cladodios de primavera (Inglese *et al.*, 2005). La temperatura afecta la capacidad de refluoración del nopal, la respuesta de la planta a la remoción del flujo floral de primavera (FFP) es muy afectada por las temperaturas prevalentes durante la remoción (Barbera *et al.*, 1991; Brutsch y Scott, 1991; Nieddu y Spano, 1992). Altas temperaturas inducen más cladodios nuevos que frutos; bajas temperaturas (<20/15°C día/noche), pueden suprimir la segunda brotación.

RESPUESTA A LA LUZ

Los cladodios sombreados de *O. ficus-indica* generalmente no generan frutos (García de Cortazar y Nobe, 1992), debido probablemente a que en esas condiciones no acumulan el peso fresco suficiente para soportar el desarrollo reproductivo. La tasa de asimilación neta de cladodios de *O. ficus-indica* se hace negativa en un nivel de radiación fotosintéticamente activa (RFA) de 5 mol m² día⁻¹ y alcanza el 90% del máximo con una RFA de 20 mol m² día⁻¹ (Nobel, 1988). Los efectos del sombreado sobre la evocación de flores fueron demostrados claramente por Cicala *et al.*, (1997) y Deidda *et al.*, (1992). Si la luz es suprimida durante dos meses antes de floración se inhibe hasta el 80% el flujo de flores, una indicación de que la evocación floral ocurre muy cercana a la emergencia de las yemas. Por lo tanto es necesario que la planta cuente con suficiente intensidad de luz durante el periodo invernal de descanso para una floración regular. El sombreado aplicado 5 días después de la remoción del flujo floral de primavera también inhibe la aparición del segundo flujo (Barberas *et al.*, 1993a).



El sombreado también afecta la calidad del fruto, dependiendo de su extensión y el intercambio de sucrosa dentro del árbol. El sombreado completo de la fuente principal de fotoasimilados para el fruto por 45 días después de la floración no tiene influencia en el peso de fruto, calidad o época de maduración. Por otro lado, un periodo corto de sombreado (15 días) impuesto durante las etapas tempranas de desarrollo del fruto afecta significativamente el peso del fruto, pero no el contenido de sólidos solubles totales o la firmeza del fruto ni la época de maduración. Aun cuando el cladodio productivo sea sombreado por un periodo corto periodo antes de la floración, los frutos no recuperan su crecimiento máximo. Al igual que otras frutas como el durazno y la manzana, el peso de fruta parece estar relacionado con la tasa de crecimiento de fruta alcanzada durante etapas tempranas del desarrollo del fruto. En esta etapa, el suministro de fotoasimilados para el cladodio productivo es crucial para soportar el crecimiento del fruto, probablemente debido a la demanda competitiva del crecimiento vegetativo y reproductivo (Inglese *et al.*, 1999).

Esta respuesta es congruente con el hecho de que el raleo de fruta es más efectivo cuando se aplica no más tarde de 3 semanas después de floración (Inglese *et al.*, 1995 a). Dado que la asimilación neta de los cladodios sombreados es negligible, el crecimiento de fruta en cladodios muy sombreado por periodos largos durante el crecimiento de la fruta deben depender de una translocación intensiva de fotosintatos de ramas con cladodios no sombreados (Inglese *et al.*, 1994; Luo y Nobel, 1993). La movilización de carbohidratos de almacenamiento hace el crecimiento del fruto se parcialmente dependiente de la densidad reducida de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) - a longitudes de onda de 400-700 nm- en la ubicación del fruto en el dosel vegetal. La maduración del fruto en cladodios sombreados ocurre más tarde que en los cladodios no sombreados. El patrón de distribución de la PPFD dentro del dosel es más reducido que aquellos ubicados en la parte superior de la planta. La madurez del fruto varía con la planta y el cladodio productivo, debido principalmente la diferencia en tiempo desde la formación de la yema floral, el desarrollo y la floración (Barbera e Inglese, 1993). El patrón de distribución de PPFD dentro del dosel incrementa esta variabilidad, dado que la sombra retrasa la madurez de acuerdo a la longitud del periodo de sombreado.

En conclusión, la gran variabilidad de la calidad de la fruta y el tiempo de maduración entre árboles que ocurre en el nopal (Barbera e Inglese, 1993), puede ser parcialmente explicado en términos de la distribución de PPFD dentro del dosel.

BIOLOGIA REPRODUCTIVA

La producción de fruta de nopal es extremadamente variable. Se han reportado rendimientos de 20-30 ton ha⁻¹ en Israel e Italia (Barbera e Inglese, 1993; Nerd y Mizrahi, 1993) y de 10 a 30 ton ha⁻¹ en Sudáfrica (Wessels, 1998a; Brustch y Zimmerman, 1993). La amplia variabilidad del rendimiento depende del diseño de la huerta (espaciamento entre plantas), prácticas culturales, condiciones ambientales y fertilidad del cultivar. Las plantas comienzan a producir a los 2-3 años después de establecidas y alcanzan el máximo potencial 6-8 años después de plantadas, permaneciendo productivas por 20-30 años y en ocasiones más, dependiendo de la poda y el manejo en general del huerto.

Fertilidad de los cladodios

En una planta madura, la mayoría (80%) de los cladodios de 1 año producen hasta el 90% del rendimiento anual. Sin embargo, las plantas muestran un amplio rango de fertilidad, dependiente de la edad de la planta, estadio de crecimiento y condiciones ambientales. El número promedio de flores producidas por cladodios individuales de 1 año de edad es de 6-9, con máximo de hasta 30-35 frutas. Los cladodios de 2 años son generalmente responsables de la renovación vegetativa y una pequeña porción de ellos (10 a 30%) produce frutos, fertilidad es inferior comparada la de los cladodios de 1 año de edad. El número de cladodios con fruta presentes en una planta en un cierto año, depende del marco de plantación, variando de 100-120 en el caso de la densidad de 350-400 plantas ha⁻¹, a 20-30 para el caso de densidades de 1000 a 1200 plantas ha⁻¹. Una planta madura de nopal, *O. ficus-indica* (L.) Mill., produce frutos y cladodios nuevos en una proporción de 4:1 cada año (Barbera e Inglese, 1993). La fertilidad del cladodio está relacionada con la acumulación de peso seco por unidad de área (García de Cortázar y Nobel, 1992). El cladodio se vuelve productivo cuando el peso seco estimado (PSE) excede un mínimo de peso seco para una área en particular de al menos 33 g. los valores de PSE se vuelven positivos después de 60-70 días de desarrollo del cladodio, y en noviembre alcanzan 13.1± 2.4 g y 10.6±1.2 g, para cladodios de primavera y del segundo flujo de la estación previa respectivamente.

Las yemas florales emergen durante la primavera (Pimenta Barrios, 1990; Gutterman, 1995; Nerd y Mizrahi, 1995a). El fotoperiodo y/o la baja temperatura invernal pueden ser la señal ambiental para la iniciación de la yema. Adicionalmente, los nutrientes pueden también afectar su inicio, dado que al exponer las plantas a fertilizantes nitrogenados (usando nitrato de amonio) se puede incrementar el número de yemas por planta (Nerd *et al.*, 1993a). La mayoría de las flores emergen en cladodios terminales de 1 año, y nuevos cladodios se desarrollan usualmente en cladodios de 2 años y



aún más viejos (Inglese *et al.*, 1994 a). En la primavera y al inicio del verano aparecen yemas vegetativas y reproductivas simultáneamente cuando los cladodios del primer flujo son removidos para inducir una segunda floración (Barbera *et al.*, 1991). Las flores se desarrollan generalmente de las areolas ubicadas sobre la corona del cladodio, pero la aparición de flores sobre las caras planas expuestas al sol es frecuente. Un cladodio puede producir 35-40 flores durante un año de floración abundante en condiciones de alta evapotranspiración, cada uno puede perder $\leq 3g$ de agua por dia^{-1} , equivalente al 15% de su peso al momento de la antesis (De la Barrera y Nobel, 2004).

Biología floral

Las yemas florales se desarrollan rápidamente, empezando con un meristemo cubierto por tricomas polilulares por encima de la cicatriz de peciolo (Nieddu y Spano, 1992). Cuando la yema floral alcanza una longitud de 0.5 cm (Wessels y Swart, 1990), el gineceo y el androceo empiezan a ser visibles dentro de la yema. El ovario es ínfero y unilocular, multicarpelado, y presenta de 6 a 12 carpelos, usualmente 8 creciendo juntos en la base, separados por la región estigmática (Nieddu y Spano, 1992). Los estambres diferencian dos tecas con dos sacos polínicos cada una; la dehiscencia de las anteras ocurre antes de la antesis (Nieddu y Spano, 1992). El polen presenta forma esférica, radio-asimétrica apolar con una superficie reticulada y poli-panto-porada, con un perímetro circular poligonal (6-8 lados) (El-Behi *et al.*, 2015).

Según Aguilar y Chávez (1995), la hormona ácido giberélico (AG) promueve el desarrollo de la yema floral y el ácido indolbutírico (AIB) estimula la brotación vegetativa. En regiones subtropicales, las yemas florales empiezan a emerger cuando la temperatura mensual promedio excede 16°C - marzo y abril en el hemisferio norte y septiembre y octubre en el hemisferio sur - (Nerd y Mizrahi, 1995), el periodo de producción de yemas florales fluctúa entre 3 y 5 semanas (Reyes Agüero *et al.*, 2006). El desarrollo floral desde yema a antesis requiere de 21 a 47 días, pero puede durar hasta 75 días (Wessels y Swart, 1990). En el hemisferio norte la antesis generalmente tiene lugar entre Mayo y Julio, y en el hemisferio sur entre Febrero y Agosto (Reyes Agüero *et al.*, 2006). Las flores son predominantemente hermafroditas. La polinización autogámica y xenogámica están presentes en *O. ficus-indica* (Nerd y Mizrahi, 1995 a). Las flores del nopal son visitadas por diferentes especies de abejas durante la polinización.

La apomixis ocurre frecuentemente en *Opuntia* (Pimienta barrios, 1990; Mondragon and Pimienta Barrios, 1990; Mondragon y Pimienta Barrios, 1995). Gil y Espinoza, (1980) obtuvieron frutos partenocárpicos de tamaño normal que contenían solamente semillas vanas a partir de flores fertilizadas tratadas con giberelinas

y auxinas en preantesis, pero para algunos clones de *Opuntia*, la ocurrencia de la polinización no es necesaria para obtener frutos sin semilla. De hecho, Weiss *et al.*, (1993), reportaron partenocarpia vegetativa en algunos clones de *O. ficus-indica*.

A partir de un estudio realizado con el cultivar "Bianca" El Behi *et al.*, (2015) hipotetizaron que la inducción de aborción de semillas podría estar basada en estenoespermocarpia parcial, similar a lo reportado para uva y Citrus (Vardi *et al.*, 2008). Los frutos del nopal son uniloculares y polispermicos. La cascara de un fruto inmaduro presenta actividad fotosintética y estomatal, contribuyendo del 8 al 10% al crecimiento del fruto (Inglese, *et al.*, 1994 b). Las areolas del fruto también tienen gloquidias y pueden presentar espinas o pelos, los cuales persistir durante la etapa de flor (Bravo, 1978).

El crecimiento de las semillas y el cambio de color debido a la madurez ocurre 30-70 días después de la antesis; las semillas son pequeñas y ovoides o lenticulares (Bravo, 1978). Los cultivares italianos de tuna (*O. ficus-indica*) poseen en promedio 273 semillas por fruto, de las cuales 146 son normales y 127 estériles (Barbera *et al.*, 1991). Los cultivares israelíes presentan en promedio 268 semillas normales por fruto (140-430) (Nerd y Mizrahi; 1995a) y los cultivares mexicanos presentan en promedio 203 semillas normales por fruto (10-448) (Reyes Agüero *et al.*, 2006).

Crecimiento del fruto

El crecimiento del fruto sigue un patrón doble sigmoidal en términos de peso seco; mostrando un incremento pronunciado del peso seco de la cascara durante la etapa I, para las semillas durante la etapa II y para la pulpa durante la etapa III del periodo de desarrollo del fruto (PDF) (Barbera, *et al.*, 1992; Nerd y Mizrahi, 1997). El crecimiento de los frutos y los cladodios nuevos implica translocación substancias de fotosintatos desde los cladodios basales (Luo y Nobel, 1993; Inglese *et al.*, 1994 b). De hecho cuando se están desarrollando más de cinco frutos sobre un cladodio de un año, se lleva a cabo una importación extensiva de asimilados, particularmente en la etapa III de desarrollo del fruto (Inglese *et al.*, 1994b).

Según Inglese *et al.*, (1994b) y Luo y Nobel, (1993) quienes investigaron la relación fuente-demanda de plantas maduras en producción, encontraron un flujo masivo de asimilados entre cladodios de diferentes edades. Los cladodios jóvenes aparentemente competían con los frutos, como lo indicaron sus tasas absolutas de crecimiento (TAC). Sin embargo, después se tornaron fuente de carbohidratos en una etapa temprana de su desarrollo (Luo y Nobel, 1993), en un momento que coincidió con el desarrollo de las flores o la primera etapa del desarrollo del fruto. La fuerza relativa de la demanda cambia acorde con las etapas de desarrollo del crecimiento estacional de frutos y cladodios (Inglese



et al., 1993). Los frutos se convierten en la demanda primaria durante la etapa III - como lo indica la reducción drástica del TAC en esa etapa -.

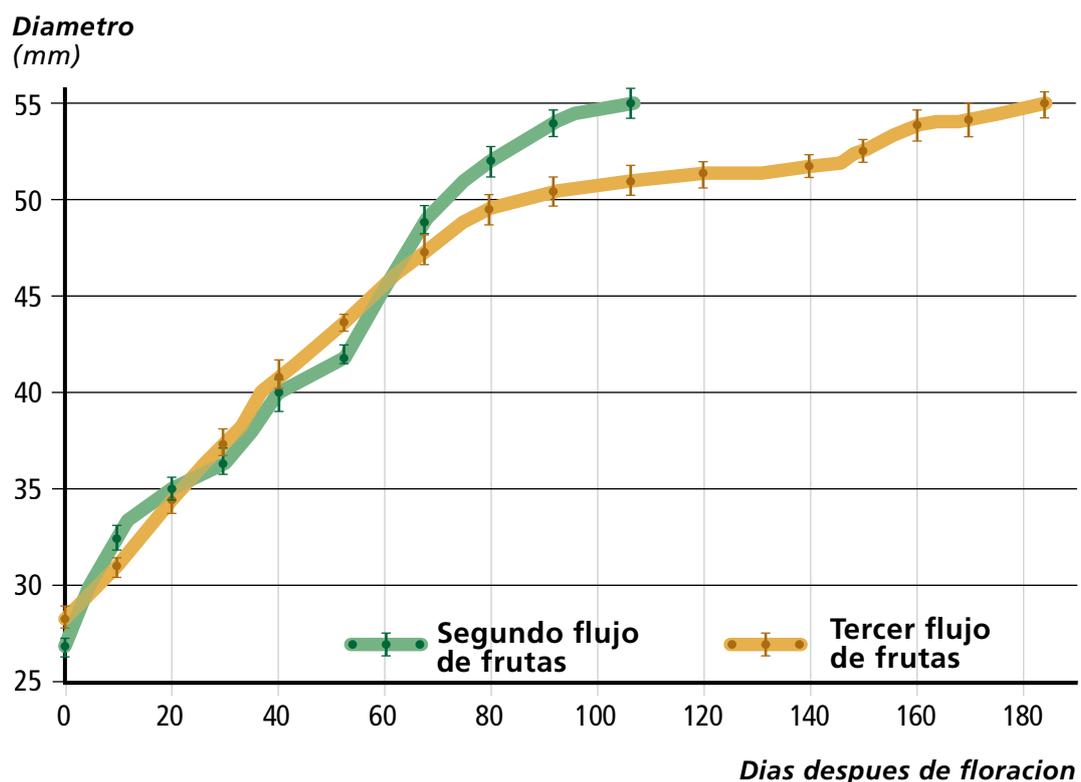
La competencia en crecimiento entre frutos y cladodios, así como la reducción en el número de cladodios nuevos seguido de remoción de la floración de primavera (RFP) pueden ser causa de alternancia de la producción, la cual también cambia con el genotipo (Inglese et al., 2002b). La alternancia en la producción del nopal depende de la disminución de los cladodios fértiles seguidos de escaso crecimiento vegetativo en el año anterior. El número de flores por cladodio fértil se estabiliza con el paso de los años; esto depende de la edad del cladodio y es mayor en cladodios de 1 año. El tamaño de fruta varía entre plantas y depende de factores tales como la arquitectura de planta y rendimiento por planta y por cladodio.

Producción fuera de temporada

La técnica más poderosa para extender la época de producción está basada en la capacidad de los cladodios de reflorecer varias veces dentro de la misma estación, ya sea de manera natural o con prácticas inductoras (Nerd y Mizrahi, 1997). La doble floración ocurre de manera natural en Salinas, California donde los frutos son cosechados en septiembre a marzo (Inglese, 1995) y en la región central de Chile, donde la cosecha de tuna dura

de febrero a abril y de Julio a Septiembre (Sudzuki Hills et al., 1993). En Italia, se obtiene una segunda floración como resultado de la remoción completa del flujo floral y de cladodios de verano. La RFP tiene lugar durante la floración principal, aproximadamente de finales de mayo y la última semana de Junio en el hemisferio norte, y en octubre en el hemisferio sur (Inglese, 1995). Las yemas florales nuevas se desarrollan en los cladodios fértiles del flujo natural, y el índice de recuperación de flores - definido por la proporción entre la nueva floración y la primera - es más alta para los cladodios con una fertilidad natural de 5-10 flores, y decrece abruptamente con cada flor adicional que se desarrolla durante el primer flujo. El tiempo de la remoción afecta la tasa de refluoración (Barbera et al., 1991; Brutsch y Scott, 1991). Por ejemplo, la remoción de flores antes de la apertura de la corola se asocia con la tasa más alta de refluoración, mientras que la remoción del primer flujo de flores después de la caída de la corola reduce la refluoración desde 50 a 70% (Barbera et al., 1991; Inglese et al., 1998). Esta reducción de la refluoración ocurre cuando las flores son removidas después de la plena floración o después de la caída de la corola está relacionada con el efecto inhibitorio de la iniciación de la yema floral por el ácido giberélico (GA). (Barbera et al., 1993a), difundido de las flores al cladodio madre (Inglese et al., 1998). De hecho, Barbera et al. (1993a), demostraron que la aplicación de GA3 durante los primeros 6 días

Figure 3
Curva de crecimiento acumulativo de frutas de *O. ficus-indica* Cv. "Gialla" obtenida del 2° y 3° flujo de floración



después de SFR inhibió totalmente la refluoración -, un indicador de que la yema floral inducida en la primavera anterior, es todavía reversible en esa etapa. El desarrollo de cladodios nuevos también inhibe la refluoración si no son completamente eliminados (Inglese *et al.*, 1994a). Los frutos tempranos generados en la primera floración antes de la plena floración, presentan el periodo más corto de desarrollo de fruto y maduran 15-20 días antes que los generados de la floración plena y 30-40 días antes que aquellos generados por floración tardía.

La tasa de refluoración depende también de las condiciones ambientales prevalecientes durante el momento de la remoción (principalmente contenido de humedad del suelo y temperatura del aire). De hecho, la extensión de la refluoración presenta grandes diferencias entre años y depende de la ubicación de la huerta (Barbera *et al.*, 1991; Brutsch y Scott, 1991; Nieddu y Sapno, 1992). Las altas temperaturas durante la iniciación de yemas inducen actividad vegetativa más que reproductiva, resultando en una baja tasa de refluoración. Liguori *et al.*, (2006) desarrollaron una estrategia basada en la capacidad de refluoración del nopal aun después de realizarla dos veces durante la primavera; la primera a inicios de junio removiendo la floración de primavera y la segunda a fines de Junio con la remoción de la segunda floración inducida. La tasa de refluoración del tercer flujo es muy irregular, variando de 25 al 40%. La planta florece durante los primeros días de agosto y el fruto madura desde Diciembre a Marzo dependiendo del tiempo de cobertura y las condiciones ambientales. La longitud del periodo de desarrollo del fruto incrementa de 100-200 días a 160-190 días para la cosecha invernal fuera de temporada, dependiendo si la tercera etapa de crecimiento del fruto ocurre cuando las temperaturas estén por debajo de los valores óptimos para el crecimiento del fruto (**Figura 3**). Sin embargo las temperaturas invernales inhiben el crecimiento del fruto y la maduración, entonces es necesario cubrir las plantas con túneles de plástico para crear las condiciones adecuadas para el desarrollo regular del fruto. La producción de tuna en invierno ocurre a campo abierto en Israel (Nerd *et al.*, 1993a). En este caso la segunda cosecha sigue a la primera y principal y ocurre sobre cladodios del mismo año desarrollados desde Mayo. Después de la cosecha la primera producción, se induce una segunda floración a través riego extensivo y fertilización nitrogenada. La segunda floración ocurre en Septiembre-Octubre y desarrolla fruta de Enero a Marzo. La fruta obtenida es de tamaño regular pero con menor porcentaje de pulpa (50-55%).

PRODUCTIVIDAD DE BIOMASA

Las altas densidades de plantación conducen a una acumulación de materia seca extremadamente alta durante el crecimiento vegetativo, y afecta profundamente la distribución de recursos hacia el fruto (García de Cortá-

zar y Nobel, 1992). *O. ficus-indica* puede presentar acumulación de materia seca que excede casi a todas las especies C_3 y C_4 cultivadas. Por ejemplo se ha predicho una productividad de 47 toneladas de peso seco (PS) $ha^{-1} año^{-1}$ de cladodios para plantaciones en alta densidad (24 plantas por m^2) con una productividad aproximada de 15 toneladas ha^{-1} medida en espaciamientos estrechos (0.24 plantas m^2), resultando en muy bajo crecimiento vegetativo vs. reproductivo, una cosecha más temprana y alternancia de la producción (García de Cortázar y Nobel). Acevedo *et al.*, (1983) midieron una productividad de materia seca de cladodios de 1 kg m^{-2} de área y 0.3 kg de fruta m^{-2} por $año^{-1}$. Asimismo, Pinos Rodríguez (2010) reportaron una producción de materia seca de 1.39 kg m^2 de materia fresca de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) para ganado vacuno.

Por otro lado Inglese *et al.*, (2012) - en una plantación comercial para fruta a baja densidad mucho más baja, 333 plantas ha^{-1} , encontró valores similares a los reportados por Nobel, (1988), pero para una biomasa total mucho más baja y peso comercial de fruta (1.2 kg m^2 de área, considerando el primero y segundo flujo de cladodios). Para el final de la primera estación de crecimiento los cladodios nuevos casi alcanzaron el tamaño final de superficie, pero alcanzaron únicamente el 65% del peso seco de cladodios de un año. Durante el segundo año de crecimiento, mostraron un incremento marginal en términos de superficie, pero un incremento significativo de peso seco (+30%). Posteriormente los cladodios presentaron un desarrollo marginal en términos de superficie, pero continuaron acumulando peso seco. El alto peso seco específico de los cladodios de las ramas de la planta es el doble de los cladodios de un año. La tasa absoluta de crecimiento para cladodios y frutos puede alcanzar, 0.12 dia^{-1} y 0.16 $^{-1}$ por día.

El componente fruto (índice de cosecha; H1) para nopal no ha sido estudiado sistemáticamente, García de Cortázar y Nobel (1992) mostraron que existen variaciones anuales en la distribución de materia seca de cladodio vs. fruto dependientes de la densidad de plantación. El incremento de la materia seca dirigida al fruto fue acompañada por una reducción en el número de cladodios y acumulación de materia seca.

La intercepción de luz, entrada de CO_2 y la productividad de planta dependen de la arquitectura del dosel de la planta y del índice de área de tallo (IAT) por unidad de área (considerando ambos lados del cladodio para IAT), - IAT sería el equivalente del índice de área foliar (IAF) - (Nobel, 1988). A pesar de su importancia, los valores de IAT para huertas de *O. ficus-indica* ha sido poco investigados. Se han medido valores de IAT de 6.5 a 8.5, considerando todos los cladodios de la planta y el área ocupada por el dosel de la planta. Se han predicho valores de productividad máxima de 2kg materia seca m^{-2} de piso por año, para un valor de IAT de 4-6; mientras que para un IAT de <3, con 20 000 y 6 000 plantas ha^{-1} , la absorción neta de CO_2 es casi



lineal con el IAT (Nobel, 1988). Estos cálculos incluyen todos los cladodios, pero no consideran que la contribución de un solo cladodio cambia con la edad del cladodio (Nobel, 1988), y tampoco que la definición del IAT debe incluir calidad de fruta, la cual depende de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cladodio madre (Inglese *et al.*, 1999). Por ejemplo las partes del dosel fotosintéticamente activas de una huerta comercial para producir tuna con 420 plantas ha^{-1} (Liguori, *et al.*, 2013) representan hasta el 60% de la superficie del dosel, con un IAT = 2.6 para la huerta y de 4.0 por árbol - i.e. valores muy inferiores a aquellos reportados por Nobel, (1988). En estas condiciones, el índice de cosecha (IC) fue aproximadamente de 29%, considerando el primero y segundo flujo de frutas, o el 26% si se considera solamente el crecimiento vegetativo y reproductivo del segundo flujo. El 40% de la radiación solar es interceptada por los cladodios menos eficientes y por las ramas lignificadas. La reserva de carbono de la parte aérea y raíz muestra que la planta madura puede tener 9-10 frutos m^2 de IAT (cladodios del año y de dos años), lo cual significa 1.1-1.4 kg de frutos m^2 . Una huerta comercial en producción puede acumular 7.5 toneladas de materia seca ha^{-1} año^{-1} , lo que significa 3.4 toneladas de carbono ha^{-1} , almacenado en la estructura de la planta (Incluyendo los frutos). Estos valores son similares a los reportados para frutales caducifolios (e.g. durazno) y para frutales perennifolios (e.g. naranja) (Tagliavini *et al.*, 2008).



RESPUESTAS POTENCIALES AL CAMBIO CLIMÁTICO

La actividad agrícola, de transporte e industrial dependen de los combustibles fósiles que liberan gases de invernadero, principalmente CO_2 . De hecho, en solo 150 años la concentración atmosférica de dióxido de carbono ha incrementado rápidamente de 280 ppm durante el periodo pre-industrial a los valores actuales de 400 ppm (IPCC, 2014). Simultáneamente, mayor concentración de CO_2 conduce a tasas fotosintéticas más altas como resultado del mayor gradiente de concentración entre la atmósfera y los sitios de carboxilación de los tejidos vegetales. Asimismo, las presiones parciales más altas conducen a una "demanda" reducida de carbono por parte de las hojas, y a la reducción de la conductancia estomatal, lo cual se ha observado en plantas expuestas a concentraciones altas de CO_2 (Smith *et al.*, 2009). A pesar de tener un mecanismo inherente a la concentración de CO_2 , el cual podría hacer a las plantas MAC insensibles a concentraciones atmosféricas más altas de este gas, más bien se ha observado un efecto de fertilización. Este es el caso del nopal expuesto al doble de la concentración de CO_2 , ya sea en cámaras ambientales o en plantas con raíz, mantenidas cámaras abiertas en la parte superior. En particular, las plantas expuestas al doble de la concentración de CO_2 acumulan 20-40%

más materia seca, que cuando se expusieron a 350 ppm (Nobel y García de Cortázar, 1991; Nobel e Israel, 1994). Adicionalmente el desarrollo de las plantas es mejorado por la fertilización con carbono. Por ejemplo la duplicación de la producción de cladodios del segundo orden a partir de cladodios jóvenes fue observada 3 meses después de exponer los cladodios maduros a alta concentración de CO_2 (Nobel e Israel, 1994). Además la extensión de la raíz puede aumentar hasta 25% bajo alto CO_2 , proveyendo temperaturas del aire optimas (30°C en promedio) (Drennan y Nobel, 1988). Estos efectos de la fertilización pueden ser provocados por las respuestas anatómicas de *O. ficus-indica*, tales como un clorénquima que es 31% más grueso bajo alto CO_2 , comparado con las concentraciones ambientales, a pesar de la reducción del 20-30% de la densidad de estomas y el engrosamiento de la cutícula por presentar más cera epicuticular (North *et al.*, 1995). Este efecto de fertilización resultante de la exposición a concentraciones elevadas de CO_2 , también ha sido observado en otros cactus (e. g. el cacto semiepifito *Hylocereus undatus*). Para este cultivo tropical presente en más de 20 países, la tasa fotosintética incrementa en 34% bajo doble concentración de CO_2 (Raveh *et al.*, 1995; Nobel y De la Barrera, 2004). Sin embargo, en el caso de plantas de *O. ficus-indica* las altas concentraciones de CO_2 también pueden conducir a bajas tasas de respiración, reducción de la actividad máxima del citocromo c oxidasa y bajos conteos de mitocondrias (Gómez Casanovas *et al.*, 2007). Así, mientras el incremento en la concentración de CO_2 puede mejorar la productividad de la planta, es cierto solo hasta cierto nivel cuando el metabolismo de la planta se reducirá.

Adicional a los efectos directos sobre la fisiología y anatomía de planta, las concentraciones elevadas de gases de invernadero es posible que impacte la productividad vegetal cambiando sustancialmente el clima del planeta. En este aspecto de acuerdo al Panel Internacional sobre el Cambio Climático (PCC) ha considerado cuatro escenarios de emisiones de gases de invernadero, que podrían conducir a diferentes situaciones durante este siglo (**Tabla 2**). Estos escenarios consideran los llamados **Patrones Representativos de Concentración (PRC)** considera escenarios que conducen a un incremento dado en la radiación relativa a la que existía en 1950 y que difieren de escenarios previos de emisiones (A1, B1, A2, B2) en los cuales se consideran explícitamente las políticas internacionales ambientales y de desarrollo (IPCC, 2014).

- RCP2.6 Es el escenario más optimista. Sin equivalencias anteriores consideradas por el IPCC, el PRC2.6 se basa en políticas astringentes de mitigación que podrían resultar en la remoción neta de gases de invernadero de la atmósfera y podrían conducir a una temperatura global de $\leq 2^\circ\text{C}$ más alto que el clima preindustrial.
- RCP4.5 et RCP6.0 son dos escenarios de emisiones intermedios y plausibles. Los escenarios previos y

TABLA 2 Patrones Representativos de Concentración (RCPs) considerados en los modelos de cambio climático global.

RCP	Equivalente en el escenario anterior del IPCC*	Emisiones de gases de invernadero	Año 2100 (CO ₂ -eq.) (ppm)	Fuerza radiante relativa a 1750 (W m ⁻²)	Incremento de temperatura
RCP4.5	B1	Mitigación astringente	430-480	2.6	< 1.5
RCP6.0	B2	Intermedia	580-720	4.6	2-3
RCP2.6	n/a	Intermedia	720-1 000	6.0	3-4
RCP8.5	A2/A1FI	Muy grande	> 1 000	8.5	> 4

Fuente: IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático)

equivalentes del PICC son aquellos de la familia B, los cuales consideran la adopción de tecnología verde con una reducción consecuente en la dependencia de combustibles fósiles, mientras difieren en el grado de cooperación internacional.

- RCP8.5 es el escenario más extremo el cual asume que a pesar de la reducción de metas y acuerdos internacionales, el mundo todavía dependerá fuertemente de combustibles fósiles.

La extensión del cambio ambiental ocurriendo durante este siglo depende del cumplimiento de las metas de reducción de emisiones de gases de invernadero acordada por la mayoría de los países en 2015, incluyendo sus dos principales contribuyentes (Estados Unidos y China).

Este inminente cambio climático es posiblemente el más detrimental a la productividad agrícola (Monterroso Rivas *et al.*, 2011; Lobell & Gourdji, 2012; IPCC, 2014; Ovalle Rivera *et al.*, 2015). Sin embargo, para ciertas plantas cultivadas tipo MAC, las nuevas condiciones ambientales pueden resultar en un incremento del área adecuada para su cultivo (García Moya *et al.*, 2012; Lobell & Gourdji, 2012). Naturalmente una mejor adaptación de las plantas MAC ambientes cálidos y secos es el hecho de que el intercambio de gases ocurre en la noche cuando a temperatura del aire en más baja. Así mismo la productividad de las plantas MAC es predominantemente controlada por las temperaturas nocturnas del aire (cuando ocurre el intercambio de gases), más que por las temperaturas diurnas (cuando los estomas están cerrados) (Andrade *et al.*, 2007). En la mayoría de los casos la temperatura nocturna que se asoció con la máxima absorción de CO₂ por las plantas MAC varía entre 10 y 20°C (Nobel, 1998). Así que mientras que la temperatura del aire sea apropiada puede ocurrir una absorción sustancial de CO₂ aún bajo condiciones de temperaturas diurnas crecientes. De hecho, dado el crecimiento esperado de la productividad potencial de varias especies de agave en regiones tropicales y subtropicales del hemisferio occidental, su cultivo ha sido propuesto para fijación de carbono,

mitigación de la erosión del suelo y la producción de biomasa para la elaboración de biocombustibles (García Moya *et al.*, 2010).

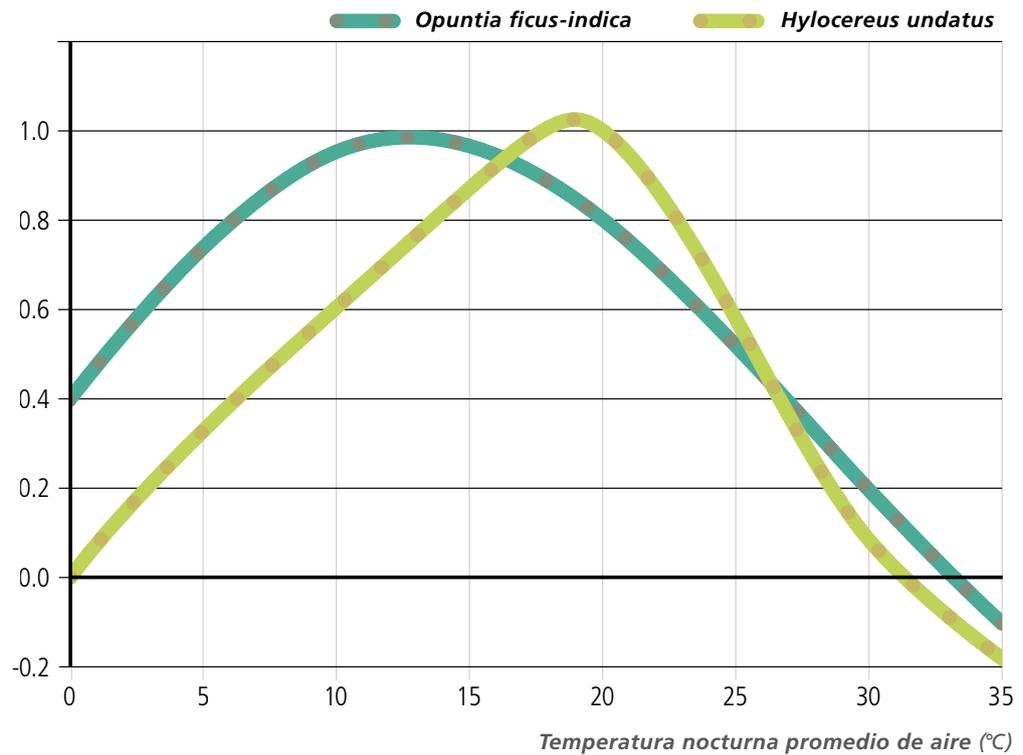
Las temperaturas más altas del año podrían ser también ventajosas para cactus cultivados. Por ejemplo, mientras la temperatura nocturna media del aire de 12°C se asocia con un intercambio máximo de gases por *O. ficus-indica*, esta planta es capaz de funcionar adecuadamente en un amplio mundo de condiciones, al menos un 80% de la absorción máxima de CO₂ puede alcanzarse entre 6 y 20°C (Figura 4; Nobel, 1998; Nobel *et al.*, 2002). El caso de *Hylocereus undatus* es ligeramente diferente. Para este cultivo tropical las temperaturas más altas del aire podrían conducir a un incremento potencial del área para su cultivo dado que su temperatura óptima de absorción de CO₂ es de 20°C (Figura 4; Nobel, 2002). Sin embargo, para esta planta, el rango de temperaturas del aire que se asocian a altas tasas de intercambio de gases es más bien estrecha, especialmente si se compara con la de *O. ficus-indica*, para el cual se requiere temperatura del aire entre 14 y 23°C para alcanzar al menos 80% de la absorción máxima de CO₂ (Figura 4; Nobel *et al.*, 2002).

Cambios mínimos en la temperatura del aire determinarán la productividad promedio de los cultivos, incluyendo *O. ficus-indica* y *H. undatus*. Sin embargo la proporción la velocidad de calentamiento y la severidad de los eventos climáticos extremos - i. e. olas de calor no frecuente, heladas, sequías o lluvias inusualmente fuertes, posiblemente se harán más frecuentes y severas a causa del cambio climático- y determinarán la sobrevivencia actual de las plantas y limitarán su cultivo (IPCC, 2014; Nobel, 1998). La tolerancia a la temperatura determinará si una especie vegetal será capaz de soportar incrementos frecuentes y episodios severos de alta temperatura. Según Nobel (1988) y Drennan (2009) la temperatura letal para 18 especies de cactus es aproximadamente 57°C. *O. ficus-indica* puede fácilmente sobrevivir a temperaturas hasta 66°C, mientras que *H. undatus* puede únicamente resistir hasta 55°C - que es la tolerancia más baja a las altas temperatura para un cacto - (Nobel; 1988 y Drennan; 2009).

Figura 4

Respuestas en la absorción total diaria neta de CO₂ de los cactus cultivados *Opuntia ficus-indica* e *Hylocereus undatus* a las temperaturas nocturnas promedio del aire. Usado con el permiso de la California Botanical Society por Nobel et al. (2002)

Absorción neta diaria de CO₂ por unidad de área de tallo (fracción del máximo)



Para muchas especies, la tolerancia a la temperatura es determinada por la temperatura media del aire prevaiente. De hecho, un incremento de 10°C en la temperatura del aire a la cual las plantas son expuestas conducen a un incremento promedio de 5.3°C de la temperatura letal de 18 especies de cactus (Novel; 1988 y Drennan; 2009). Por ejemplo, plantas de *O. ficus-indica* que se han incubado bajo una temperatura promedio de 35°C la temperatura letal es de 60°C, pero para plantas incubadas a 45°C la temperatura ideal es de 66°C

lo cual significa una aclimatación de esta especie equivalente a 4.2°C para un incremento de 10°C en la temperatura del aire (Nobel, 1988; Nobel et al., 2002). En contraste, la habilidad de *H. undatus* es la más baja para un cacto. Para esta trepadora neotropical, al aumentar la temperatura del aire de 20 a 30°C escasamente mejora la tolerancia a la alta temperatura de 54.0 a 55.4°C; adicionalmente las altas temperaturas promedio conducen a una inhibición del intercambio de gases y muerte de la planta (Nobel et al., 2002).

05

Recursos genéticos de nopal (*Opuntia* spp.)

Candelario Mondragón Jacobo^a y Innocenza Chessa^b

^a Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México

^b Universidad de Sassari, Italia



INTRODUCCIÓN

Las predicciones de la población mundial para 2050 son pesimistas, ya que se estima que esta alcanzará 9 mil millones considerando la tasa actual de nacimientos. Los países que están en zonas semiáridas tienen las poblaciones de mayor crecimiento. Estos también están ubicados en las zonas más secas del mundo donde el agua será dos veces más escasa para el año 2050 (UN-DESA, 2015). El cambio climático también afectará la superficie de tierra que actualmente está en condiciones semiáridas. Las poblaciones se están expandiendo más rápido en aquellas regiones en las cuales es difícil de cultivar alimento. Por esta razón los gobiernos deben de dar atención inmediata y constante a los efectos del cambio climático, ya sea que sus países estén actualmente afectados o que potencialmente puedan ser afectados.

El uso efectivo del agua y de la tierra, una selección adecuada de especies vegetales que estén de acuerdo con los requerimientos agroclimáticos de sitios específicos, mejores estrategias para aumentar los rendimientos, y genotipos mejorados de plantas y animales están entre las herramientas para enfrentar esta catástrofe. Las plantas nativas de usos múltiples como el nopal (*Opuntia* spp.) pueden ser incluidas en la lista de cultivos alternativos dada su tolerancia a la sequía y su amplio rango de usos potenciales: como fruta, forraje o como hortaliza, adicional a la utilización tradicional como cercas vivas que protegen las viviendas familiares en regiones secas o como una medida de control de la erosión (Mondragón y Chessa, 2013). Los recursos genéticos están destinados a ser la base de todas las futuras aplicaciones del nopal; las exploración intensiva el uso efectivo *In situ* y la conservación *Ex situ*, la evaluación dinámica en sitios nuevos y proyectos vigorosos de intercambio de germoplasma y mejoramiento, todos ellos son necesarios para obtener el potencial completo de este valioso recurso. Los científicos deben de identificar caracteres para uso en programas de mejoramiento genético intensivo: características nuevas y antiguas que sean útiles para enfrentar la sequía, las heladas, las plagas nativas o foráneas y las enfermedades, así como la mejora del contenido nutricional.

Este capítulo resume el avance logrado en actividades relacionadas al germoplasma en aquellos países que poseen la más amplia variabilidad del nopal ya sea nativo o introducido. También describe los aspectos básicos

de la exploración de recursos genéticos de *Opuntia*, documentación, y conservación *In situ* y *Ex situ*, y utilización.

Exploración de recursos genéticos

Antes de invertir tiempo y recursos en la colección de germoplasma de nopal, es necesario poner en perspectiva la posibilidad de encontrar variabilidad genética real y útil, su uso potencial y más importante, el costo a largo plazo de mantener una colección de germoplasma. Es entonces imperativo conducir una investigación bibliográfica para entender los orígenes y las rutas de dispersión, para poder verificar la necesidad de estudios más precisos antes de emprender la recolección en campo.

Está bien documentado que el nopal se originó y se domesticó en la región central de México, un país que todavía posee la más amplia variabilidad de especies silvestres y domesticadas y variedades cultivadas. Es bien conocido que durante el periodo colonial, el nopal domesticado fue introducido a Europa y posteriormente a África del norte, principalmente aquellos países que fueron ocupados por España, Francia e Italia. Otros eventos históricos y económicos explican que la presencia del nopal en el cercano oriente y Asia Central y otras partes del mundo durante los siglos XVI al XVIII. Desde 1980 ha habido esfuerzos significativos de organizaciones gubernamentales así como organizaciones no gubernamentales internacionales para reducir los efectos de la desertificación en África del norte y otras áreas, donde el cultivo del nopal se encuentra entre las medidas para controlar erosión y para aumentar la recuperación de la vegetación.

Variabilidad del germoplasma

Hay una conexión directa entre los eventos históricos anteriormente mencionados y la variabilidad del germoplasma: las primeras introducciones incluyeron una base de germoplasma restringida, principalmente de accesiones domesticadas, mientras que las más recientes introducciones usaron un número más limitado aun de accesiones, considerando únicamente unas cuantas variedades sin espinas. A pesar de la evidencia y de la excelente adaptación del nopal en algunas áreas tales como el este de África, el entrecruzamiento de genotipos relacionados o emparentados cercanamente no producen nuevos alelos de manera inmediata.

Es muy difícil generar nueva variabilidad en el germo-

plasma de *Opuntia*. Esto es debido a la alta tasa de plántulas apomicticas y a la longitud del periodo juvenil (que puede durar entre 4-7 años; Mondragon Jacobo, 2001); estas características biológicas del nopal reducen las posibilidades de entrecruzamiento para generar nuevos genotipos a través de la recombinación. Por otro lado los genotipos domesticados así como los genotipos silvestres son poliploides, una característica genética que disminuye la posibilidad de expresión de mutaciones naturales. La combinación de estos caracteres reduce significativamente el potencial para generar nueva variabilidad en otros sitios que no sean los del centro de origen y domesticación.

Exploración del germoplasma

Para una exploración exitosa es importante considerar lo siguiente:

- Buscar fuentes de conocimiento local en lo que se refiere al conocimiento de las plantas, nombres locales, forma de utilización, integración de la planta en la cultura local y la historia. Es siempre recomendable invitar guías de la región para apoyar los recorridos de campo, no únicamente extensionistas sino también pastores, recolectores de leña, recolectores de fruta y yerbas, quienes usualmente están más familiarizados con la flora local.
- El conocimiento de la fenología del nopal en el área de interés es crucial, dado que todos los descriptores están basados en caracteres visuales que conciernen todas las partes de la planta; sin embargo las raíces, las flores y las frutas son esenciales para lograr una integración botánica precisa. Un carácter común usado para identificar accesiones y variedades es color de fruto, ambos interno y externo. Sin embargo, el color de fruto es un carácter dinámico, cambiante con la etapa de madurez, mientras que el color de pulpa cambia también con la madurez, y por esta razón la exploración debe ser guiada por un líder experto que tenga menos posibilidades de ser confundido.
- Es indispensable una descripción geográfica del área: altitud, exposición al sol y humedad del suelo, todos ellos afectan el clima. El clima a su vez puede afectar la época de madurez. La falta de conocimiento geográfico es probablemente una de las primeras razones por la presencia de accesiones redundantes en colecciones *Ex situ*. Las accesiones de madurez temprana o tardía, pero colectadas en diferentes localidades, florecerán y producirán fruta al mismo tiempo cuando son plantados lado a lado en las colecciones.
- La presencia o ausencia de espinas es otro carácter interesante e importante. Los sistemas de producción moderna demandan preferentemente variedades sin espinas; sin embargo hay menos variabilidad en los cultivares sin espinas comparados con los que poseen espinas, los cual probablemente sea explicado como

una mutación de los cultivares con espinas. Adicionalmente, la identificación de accesiones sin espinas es más difícil dado que el proceso no puede ser completado a menos de que las plantas tengan frutos.

La prospección de recursos genéticos de nopal ha sido un tópico de interés desde el inicio del S. XXI. Se han conducido estudios del germoplasma en Marruecos (Arba *et al.*, 2002), Turquía (Bekir, 2006), Túnez (Zoghalmi *et al.*, 2007), Argentina y Etiopía (Haile y Belay, 2002), Mondragon Jacobo y Tegegne, (2006), permitiendo la identificación de accesiones de consumo local principalmente para fruta fresca. Estos estudios se han enfocado a las poblaciones semi-domesticadas y domesticadas. Las fuentes históricas indican un origen común de los nopales presentes en esas áreas, nopales domesticados traídos de México después del descubrimiento de América que fueron dispersados por la actividad colonialista de Italia, España, y otros países europeos, y por los países árabes en África del Norte y Cercano Oriente. Las observaciones de campo apoyan la hipótesis que el pool original fue restringido principalmente a accesiones domesticadas, que se adaptaron y segregaron en estos nuevos ambientes. Por esta razón, aunque la variabilidad es reportada como amplia, es de hecho relativamente estrecha cuando se compara con el pool conocido.

Han existido esfuerzos extraordinarios en México para coleccionar nopales domesticados y semidomesticados con apoyo de una iniciativa del gobierno federal enfocada a los cultivos nativos, el Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos (SINAREFI). Un proyecto más modesto fue la colección de ancestros silvestres implementado por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); esta colección puede ser visitada en las instalaciones de la UNAM en la Ciudad de México. Actualmente la atención se ha volcado en la conservación y la utilización más que en la protección del germoplasma.

Que queda por coleccionar? La región del Tigray en el Este de África ciertamente merece una atención especial; esta cubre parte de Etiopía y Eritrea, y contiene el área más vasta de nopal "naturalizado" de África, originado de introducciones realizadas durante el siglo XIX. Un intento para caracterizar la variabilidad local fue reportado por Mondragon y Tegegne en (2006). Los nopales se han dispersado a regiones remotas de China, India y Madagascar, y es necesario explorar y caracterizar la variabilidad presente en esas regiones, para compararla con los genotipos disponibles en los bancos de germoplasma, así como evaluar las necesidades de conservación y valorar la presencia de caracteres útiles en el mejoramiento genético.

Otro caso interesante, podría ser la recuperación de la colección de variedades Burbank obtenida por Sudáfrica a inicios del siglo XX. La colección contiene va-



riedades de nopal sin espinas desarrolladas por Luther Burbank en California así como variedades de origen mexicano. Esta colección es actualmente mantenida por la Universidad de Free State, que la ha utilizado eficientemente en investigaciones sobre el uso en la alimentación animal y nutrición humana.

Mantenimiento del germoplasma

El mantenimiento regular de una colección de nopales es caro, considerando que la planta es perenne y que requiere de largo tiempo para estabilizar la producción; 5-7 años en el caso de nopales tuneros. Se requieren también varios años para obtener resultados significativos en relación a la producción de forraje u hortaliza; a pesar de los anteriores algunos datos preliminares pueden ser obtenidos después del segundo año.

Otro factor importante es la variabilidad agroclimática de las áreas de producción; para obtener resultados aplicables es necesario contar con más de un sitio experimental, lo que incrementa los costos de los proyectos de investigación o extensión, para los cuales la existencia de fondos es incierta, dependiendo del país que este proveyendo los fondos. En general existe una tendencia global de escasez de fondos dedicados a la conservación a largo plazo. El mantenimiento puede ser facilitado a través de una combinación de metas y la colaboración entre equipos multidisciplinarios, usando los mismos experimentos o colecciones para más de un propósito; aun así prevalece la incertidumbre, dado que cada donador fija sus propios términos, define sus temas de interés y el tiempo de aplicación de los fondos.

BANCOS DE GERMOPLASMA, COLECCIONES NUCLEO Y ENSAYOS DE VARIEDADES

Es aconsejable que todos aquellos países que producen nopal adquieran, coleccionen, conserven y evalúen genotipos que sean diferentes aquellos de uso comercial. Tales colecciones sirven como sitios exploratorios y como reservas de nueva variabilidad para uso futuro. Estas colecciones son también una valiosa fuente de información del comportamiento de accesiones en sitios específicos, dado que los datos de adaptación y productividad son caracteres difíciles de extrapolar.

La extensión y naturaleza de estas colecciones varía: desde ensayos de variedades hasta bancos de germoplasma formales. Los bancos de germoplasma no solamente son recomendables, sino casi obligatorios en aquellos países que poseen centros de origen y centros secundarios. Las colecciones núcleo son más pequeñas en tamaño y contienen genotipos específicos útiles pa-

ra el mejoramiento y evaluaciones agronómicas preliminares. Los ensayos de variedades deben incluir nuevos genotipos prometedores - ya sean estrictamente nuevos o simplemente nuevos para el área - y usualmente el diseño impone la necesidad de repeticiones. La extensión a la cual se evalúa la utilidad del germoplasma depende de varios factores:

- Cultivo - ¿Qué tan importante es?
- Sitio - ¿Qué tan representativo es de las condiciones agroclimáticas?
- Servicios de extensión - ¿Qué tan efectivo son los servicios de extensión ligados a la producción de nopal?

DOCUMENTACION DE RECURSOS GENETICOS

Los recursos genéticos mantenidos en una colección incrementan su utilidad si se compilan datos completos y precisos. Además de datos de pasaporte adecuados, y formación acerca del comportamiento de las accesiones a través de los años pueden representar una fuente valiosa de información para investigadores y extensionistas. Los datos de manejo y mantenimiento deben ser conservados para:

- Monitorear el estatus del germoplasma existente a través de todas las fases de la conservación;
- Optimizar la eficiencia de los programas de conservación y
- Facilitar el intercambio de materiales e información entre bancos de germoplasmas.

La principal preocupación acerca del manejo de recursos genéticos es el incremento en el número de accesiones, usualmente asociado con redundancia. Para descartar los duplicados y prevenir o reducir la adición de accesiones repetidas a las colecciones de germoplasma, es necesario contar con información exhaustiva de las accesiones existentes y de las nuevas entradas.

La información asociada con accesiones colectadas es tan importante como el material vegetal que ya se tiene los bancos (Given, 1994). Para cada accesión debe de existir información descriptiva para optimizar utilización, y llenar las necesidades específicas de los usuarios, y apoyar decisiones relacionadas con la selección de variedades.

Al igual que con otros cultivos importantes, la caracterización y evolución del pool de genes disponibles es esencial para programas de mejoramiento genético del nopal. La caracterización fenotípica y genotípica del germoplasma provee oportunidades para identificar accesiones genéticamente diversas y agrónomicamente superiores para el mejoramiento del nopal como un cultivo multipropósito (Chessa, 2010).



La simplicidad, velocidad y el costo relativamente bajo hace que los marcadores/caracteres morfológicos sean los marcadores genéticos más ampliamente utilizados para la caracterización de germoplasma. Existe un descriptor de nopal compilado por Chessa y Nieddu, (1997), que facilita la estandarización de la caracterización de las accesiones colectadas, siguiendo el formato internacional avalado por Bioversity International. También se ha conseguido la caracterización basada en morfología siguiendo la lista de descriptores y catálogos con el objetivo de mejorar la utilización de accesiones de origen Mexicano y Sudafricano (Gallegos Vázquez *et al.*, 2005; Potgieter y Mashope, 2009). Reyes Agüero *et al.*, en (2009) propusieron un esquema de clasificación para la identificación de variantes de la especie *Opuntia* silvestres y cultivadas de origen Mexicano. Por su parte Erre y Chessa en (2013), usaron un enfoque estadístico para identificar el valor de los caracteres para un diagnóstico diferencial, el cual se ha considerado que mejora la estandarización entre colecciones, con el cual se puede adaptar el descriptor a propósitos específicos.

La identificación y descripción de accesiones presentes en bajas poblaciones en huertos familiares para uso doméstico ha sido el tema de investigación de varios investigadores mexicanos. Este subgrupo particular de plantas está amenazado de extinción debido al aumento de eventos climáticos inusualmente severos como heladas y granizo –probablemente ligado al cambio climático- cambios de uso de la tierra, migración y otros factores sociales y económicos. Estas variantes locales que expresan los efectos de la selección de largo plazo, también son los portadores de caracteres valiosos de uso inmediato por mejoradores. Su inclusión en colecciones núcleo para el mejoramiento puede ser valioso ya que ahorrarían tiempo y recursos en el proceso de mejora genética. Una descripción de las mejores “variedades” así como de poblaciones sobresalientes restringidas o escasas de la región central de México fue publicada por Gallegos Vázquez y Mondragon Jacobo (2011). La descripción incluye datos, fotografías, mapas de distribución e información adicional sobre los caracteres de interés comercial de estas “variedades”. Estos datos son valiosos no solamente para los investigadores, sino también para comerciantes y consumidores, bajo el supuesto de que mientras más amplia sea la audiencia mayor es el interés por la conservación.

Una plataforma común, basada en los mismos caracteres, escalas y unidades de medida es necesaria a nivel global para facilitar el intercambio de información sobre material vegetal. La Red de Información sobre Recursos de Germoplasma (GRIN) - alojada en el servidor (<http://www.ars-grin.gov>) provee información acerca de las plantas, animales, microbios e invertebrados- podría ser útil también para nopal. La base de datos de la FAO, Hortivar (<http://faoo-org/hortivar/>), que aprovecha la

colaboración directa de los usuarios, se enfoca en los cultivos comerciales de cultivos hortícolas, está a la espera de que se anoten los datos de variedades de nopal.

EL USO DE HERRAMIENTAS MOLECULARES MODERNAS PARA EXPLICAR LA VARIABILIDAD Y REDUCIR LA REDUNDANCIA DEL NOPAL

La identificación fenotípica basada únicamente en marcadores morfológicos puede ser imprecisa debido a las interacciones complejas de fenotipo y ambiente que gobiernan la mayoría de los caracteres de interés. El primer paso hacia la aplicación de herramientas moleculares para estudiar los recursos genéticos de nopal - redundancia, filogenia y herencia de caracteres valiosos- fue la optimización de la extracción de ADN. Desde los 1990, se han desarrollado o ajustado protocolos para extraer ADN de cladodios y raíces (De la Cruz *et al.*, 1997; Griffith y Porter, 2003; Mondragon y Doudareva, 2000), que solucionan el problema del mucilago. La adopción de kits comerciales ha facilitado enormemente el proceso de grandes cantidades de muestras, como lo reportaron Fehlberg *et al.*, (2013a) quienes evaluaron la efectividad de los kits comerciales DNAeasy Plant Minikit (Quiagen, Valencia, California, USA) para extraer ADN de espinas de 8 especies de cactus.

La mejor herramienta para evaluar la diversidad genética son los marcadores basados en polimorfismos del ADN. Existe un amplio rango de técnicas que se han desarrollado y que son comúnmente usadas para obtener las huellas genéticas de individuos y proveer información sobre la estructura genética de las colecciones de germoplasma, el descubrimiento de sinonimias y parentesco. Sin embargo, en el caso de especies menores como el nopal, el desarrollo y aplicación de los marcadores moleculares es todavía limitado.

Chessa *et al.*, (1997) reportaron la agrupación de diferentes variedades y biotipos obtenida por medio de bandas de isozimas extraídas de polen. Debido a la baja confiabilidad de estos marcadores, que son afectados por condiciones ambientales, el tipo y etapa fenológica de la planta, estos autores usaron marcadores derivados tipo PCR (reacción en cadena de la polimerasa) que son más informativos. Por su parte, Wang *et al.*, en (1998) aplicaron la técnica de RAPDs combinada con datos de morfología y fisiología para identificar cultivares de nopal tunero, de verdura y ornamentales. El banco de germoplasma de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Nuevo León fue caracterizado, revelando la presencia de duplicados por medio de marcadores RAPDs (García Zambrano *et al.*, 2006); sin embargo, estos no fueron confirmados cuando se usaron marcadores AFLP (García



Zambrano *et al.*, 2009). Los ecotipos de *O. ficus-indica* de Túnez fueron caracterizados por medio de marcadores RAPDs, identificándose 13 grupos principales, sin ninguna relación con diferentes regiones geográficas (Zoghalmi *et al.*, 2007).

Basados en el uso de AFLPs Labra *et al.*, (2003) sugirieron que *O. ficus-indica* debería ser considerada como la forma domesticada - sin espinas- de *O. megacantha* con espinas. Los marcadores AFLP fueron también aplicados para investigar las relaciones genética entre especies de tres colecciones de Opuntia de Túnez (Snoussi Trifa *et al.*, 2009). Por otro lado, el nivel de diversidad genética de clones de nopal fue evaluado en Brasil por medio marcadores ISSR (inter-simple sequence repeat) revelando bajo nivel de diferenciación genética entre ellos (Souto Alves *et al.*, 2009). Luna Páez *et al.*, (2007) usaron ADN de semillas de nopal para valorar la diversidad, usando diferentes marcadores moleculares, RAPD-PCR y cp-SSR (cloroplast simple sequence repeat) (Chessa, 2010) y RAPD-PCR con ISSR.

La historia evolutiva de *O. ficus-indica* ha sido investigada por Griffiths, (2004) por medio del análisis filogenético Bayesiano de secuencias de ADN nrITS (nuclear ribosomal ITS).

La evidencia molecular del origen híbrido de varias especies de Opuntia y su facilidad de introgresión ha sido documentada, de la misma manera se ha asumido el origen polifilético de *O. ficus-indica* (Griffith, 2003, 2009). La hipótesis de Griffith considera a *O. ficus-indica* como un grupo de múltiples clones no emparentados derivados de diferentes especies parentales y seleccionadas por características agronómicas comunes, lo cual fue apoyado por Caruso *et al.*, (2010) por medio de microsatélites. Hensen *et al.*, desarrollaron seis ISSRs altamente polimórficos y dos (EST)-SSRs loci para usarlos en la obtención de huellas genéticas de 62 genotipos de origen Mexicano, Israelí y Siciliano. Este trabajo mostro una separación clara entre accesiones cultivadas y especies emparentadas con el nopal.

Helsen *et al.*, (2009) citaron la utilidad de los datos obtenidos de marcadores moleculares y morfológicos en la planeación de la conservación - con base en la alta divergencia morfológica encontrada en las especies de Opuntia endémicas de las Islas Galápagos - como evidencia de la selección divergente y la adaptación a ambientes locales. Los mismos autores proveyeron evidencias de que la diferenciación actual entre taxas basada en morfología no estaba sustentada por datos moleculares.

Los SSRs son los marcadores preferidos en estudios de huellas genéticas y caracterización de accesiones de Opuntia por su alta variabilidad y naturaleza codominante en Italia (Cerdeña). Erre *et al.*, en (2013) aislaron un juego nuevo de microsatélites loci en diferentes especies y variedades de Opuntia. Cinco de los diez SSRs desarro-

llados fueron usados para caracterizar las colecciones de campo de Italia y Argentina. El nivel de polimorfismo y la frecuencia relativamente alta de alelos detectados sugirió que estos marcadores pueden ser usados en estudios intraespecíficos y entre especies, así como para proveer una herramienta más confiable en la clasificación de especies de Opuntia, basada en sus perfiles alélicos.

CONSERVACION DE RECURSOS GENETICOS DE NOPAL

Conservación *In situ*

La conservación *In situ* debe de ser promovida en los centros de origen y diversidad del nopal, con especial atención en los ancestros silvestres y formas semi-domesticadas. La parte central de México está sufriendo cambios significativos de uso de la tierra, lo cual pone en peligro directo a los sitios clave de la diversidad; las principales amenazas son la incorporación de tierras al pastoreo, la construcción de nuevas vías de comunicación y el crecimiento de áreas urbanas. La tenencia privada del uso de la tierra permite a individuos y comunidades decidir la suerte de las áreas silvestres, complicando los acuerdos de conservación a largo plazo.

Las amenazas naturales que se expresan en la forma de heladas, nieve y granizo inusuales - quizá asociadas con el cambio climático - también están poniendo en peligro la supervivencia de nopaleras silvestres y plantas semi-domesticadas, en particular aquellas variedades que son sensibles a heladas. En la primavera de 2016 se registraron condiciones invernales severas en algunos de los estados de la región norte de México, que poseen las nopaleras silvestres, las cuales fueron cubiertas por nieve y hielo; los efectos sobre las nopaleras todavía están siendo evaluados.

En México se han intentado diferentes enfoques para incentivar la conservación con diferente nivel de éxito: áreas naturales protegidas (federales, estatales y municipales), corredores turísticos naturales, y otros esquemas de utilización sustentable. Tales políticas deben balancearse con los intereses sociales y económicos de los grupos humanos implicados. Todas estas iniciativas están bajo escrutinio debido a los recortes presupuestales, arriesgando la protección a largo plazo de este recurso

Conservación *Ex situ*

En el hemisferio oriental, la conservación *Ex situ* es el enfoque más activo, y existen colecciones de campo en Túnez, Marruecos y Sudáfrica. Fuera de México, Italia es el país que mantiene la colección más amplia y antigua. Esta fue iniciada en 1992 y actúa como banco de germoplasma y colección para mejoramiento, contiene especímenes de *Opuntia* y *Nopalea* y el número total actual de accesiones es de 2 000. La colección incluye varie-



dades locales, híbridos derivados de polinización abierta, cruas controladas e individuos obtenidos de cultivo de embriones. En el hemisferio occidental, se cuenta con colecciones vivas en Argentina, Chile, Brasil y México; la colección de Kingsville, Texas ya no está activa, pero el Departamento de Agricultura (USDA) inicio una colección en Parlier, California, con el apoyo del Repositorio Nacional de Germoplasma Clonal.

Brasil por su lado ha orientado sus esfuerzos de conservación hacia las accesiones de uso forrajero y de doble propósito; forraje y fruta. México, como el centro de mayor diversidad mantiene varios sitios que difieren en extensión, edad y número de accesiones (**Tabla 1**). Asimismo en 2010 se inició un proyecto de conservación *In vitro* de genotipos raros con valor hortícola inmediato. Brasil reporta 1 417 accesiones, que incluyen genotipos de varios países, así como segregantes e híbridos de cruas controladas. Italia reporta alrededor de 2 200 entradas obtenidas de México, Chile, EUA, Marruecos, Argentina y Sudáfrica; estas incluyen accesiones silvestres y ecotipos, variedades locales, selecciones y poblaciones híbridas derivadas de cruas controladas, así como plantas derivadas de cultivo de embriones.

A inicios de 2011, el gobierno mexicano inauguro el Centro Nacional de Recursos Genéticos y Biotecnología (CENARGEN) en Tepatitlán, Jalisco, que servirá como repositorio nacional; sus instalaciones están diseñadas para el almacenamiento a largo plazo de todos los cultivos y organismos relevantes para la agricultura nacional, incluyendo el nopal.

UTILIZACION, PREMEJORAMIENTO Y MEJORAMIENTO GENETICO

Los intentos de mejora genética del nopal datan de fines del siglo XIX, los cuales no han producido los resultados deseados debido a dos razones:

- Complejidad biológica - todas las opuntias con valor hortícola son poliploides y presentan apomixis.
- Largo periodo juvenil - asociado con obtención limitada de productos de los programas de mejoramiento genético y proyectos costosos (ambos relacionados directamente con dificultades de financiamiento)

Como resultado, los programas de mejoramiento genético de nopal son irregulares, de corta vida y con fondos escasos. Existen cuatro programas financiados con fondos gubernamentales; México, Brasil, Italia y EUA, y uno conducido por una compañía privada. Estos programas son descritos a continuación.

Italia

El programa italiano de mejoramiento genético de nopal, se ha involucrado en la colección de descripción y documentación de germoplasma desde 1992. Ha realizado hibridaciones y es pionero del cultivo de embriones de nopal. Los productos obtenidos incluyen 12 selecciones de tuna verde, amarilla y roja (4 de cada color), adecuadas para el cultivo en los países del Mediterráneo.

TABLA 1

Inventario de los bancos de germoplasma Mexicanos, actualizado a 2014.

Uso	CRUZEN ^a	IIZD ^b	CBTA ^c 38	INIFAP-SLP ^d	
Fruta fresca	357	16	302	136	908
Fruta y forraje	5	–	–	–	17
Forraje	7	2	3	3	47
Hortaliza	39	5	30	3	86
Triple uso	2	–	–	–	2
No reportada (n. a.)	–	23	–	–	28
Alimento animal	–	–	–	–	29
Ornamental	–	–	–	–	4
Condimento	–	–	–	–	15
Total	410	46	335	142	1 021

^aCRUZEN: Centro Regional del Centro Norte. Universidad Autónoma De Chapingo, El Orito, Zacatecas, México.

^bIIZD: Instituto de Investigaciones de Zonas Desérticas. Universidad Autónoma De San Luis Potosí, México.

^cCBTA: Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario 30. Ojocaliente, Zacatecas, México

^dINIFAP-SLP: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias - Campo Experimental, San Luis Potosí, México.

México

El programa empezó en 1995 y ha conducido hibridaciones y selección usando los mejores genotipos mexicanos para producción de fruta, y para obtener variedades multipropósito, se pretende mejorar la calidad de fruta y adaptación a diversos ambientes. A la fecha se han reportado tres variedades mejoradas (Gallegos Vázquez y Mondragón Jacobo, 2011). Desde 2013 la actividad del programa se ha reducido debido a la falta o escasez de fondos.

Brasil

Este programa está ubicado en la región semiárida tropical de Pernambuco y se enfoca en el desarrollo de variedades mejoradas de nopal para forraje. Su inventario incluye las variedades "Gigante", "Redonda" y "Miúda", además de 1061 clones derivados de polinización abierta de "Palma Gigante" y 171 de "Palma Miuda" y 17 clones obtenidos de Chapingo, México, además de 19 clones de CPATSA, 5 de Rio Grande do Norte y 4 de Petrolina, para un total de 1417 accesiones.

Estados Unidos de América

La compañía D'Arrigo Bros., ubicada en Salinas, California, que produce y comercializa tunas se ha interesado en el mejoramiento genético del nopal, reporto cuatro variedades mejoradas para uso privado: "Sweet Emerald", "Sweet Crimson", "Sweet Purple" y "Sweet Sunset" (<http://www.andyboy.com/products/cactus-pear>) para reforzar su línea de productos frescos novedosos. La Unidad de Recursos Genéticos para Zonas Áridas perteneciente al Servicio de Investigación Agrícola del

USDA (NALPGRU) mantiene y evalúa germoplasma de nopal buscando adaptación a suelos áridos, altos niveles de salinidad, selenio y boro en el suelo. El resultado son cuatro nuevos cultivares, obtenidos en co-propiedad con Fresno State, Diener's Red Rock Ranch y el USDA. Red Rock Ranch intenta desarrollar y vender productos en forma de jugo y mezclas de bebidas energéticas derivadas de las nuevas plantas (<https://www.fresnostate.edu/jcast/cati/update/2013-fall/opuntia-study.html>).

HACIA LA UTILIZACION SOSTENIBLE DEL NOPAL

Las nuevas variedades son el eje de cualquier sistema agrícola sustentable; estas están bajo desarrollo en México, Brasil e Italia y hasta cierto punto en EUA. Dado que los países en desarrollo serían los más beneficiados por el cultivo de nopal, es justificable promover la cooperación internacional, compartiendo experiencia, recursos e instalaciones. Para conseguir lo anterior los centros internacionales podrían promover proyectos colaborativos.

Mientras tanto, los países con nopales nativos o naturalizados deben intensificar la colección y evaluación de las mejores accesiones, seguido de la propagación de selecciones sobresalientes bajo protocolos fitosanitarios estrictos. Para otros países nuevos en el cultivo del nopal, es recomendable la introducción de genotipos selectos, prueba y propagación de los que muestren mejor adaptación a las condiciones locales, antes de lanzar programas de cultivo a gran escala.



Producción de tuna y manejo postcosecha

Johan Potgieter^a y Salvatore D'Aquino^b

^a Consultor Hortícola. Elands Bay. Western Cape, Sudáfrica

^b Consejo Nacional de Investigación. Instituto de las Ciencias de la Producción de Alimentos. Sassari, Italia



INTRODUCCIÓN

La expansión mundial del cultivo de nopal fue predicha por Nobel en (1988). Las predicciones se basaron en la biología ambiental particular del nopal, la cual hace posible el desarrollo de sistemas agrícolas de producción sustentables en áreas con limitaciones de agua y de suelos pobres. Además, había un interés creciente en la producción de tuna debido al crecimiento de la demanda de frutas exóticas en los mayores mercados mundiales (Inglese *et al.*, 1995a). Adicionalmente, las limitaciones de agua para riego para la expansión de los principales cultivos en zonas áridas y semiáridas han forzado a los productores a buscar cultivos alternativos que posean mayor tolerancia a la sequía y mayor eficiencia en el uso del agua (EUA). El nopal es cultivado en un rango amplio de ambientes, resultando en diferencias importantes en las prácticas de manejo de huertas (Inglese *et al.*, 2009), Liguori e Inglese, 2015). Afortunadamente, desde los noventas, se ha incrementado la información disponible sobre el manejo de las huertas y otros aspectos del cultivo del nopal tunero (Felker e Inglese, 2003).

Actualmente el cultivo del nopal para fruta tiene lugar en áreas semiáridas de al menos 18 países de ambos hemisferios y en más de 100 000 hectáreas, esta cifra no incluye las plantas naturalizadas, ni las cultivadas para consumo doméstico, comúnmente encontradas en muchos países (Inglese *et al.*, 2002a). El país con la mayor superficie de nopal cultivado es México (51 112 ha) (Reyes Agüero *et al.*, 2013), mientras que otros países, tales como Italia, Chile y Sudáfrica, Argentina e Israel, también cultivan comercialmente esta fruta (Inglese *et al.*, 2002a).

La percepción errónea de que el nopal no necesita de prácticas de cultivo como otras plantas y de que requiere pocos cuidados persiste hasta la actualidad hasta cierto punto. Algunos investigadores pioneros - (Griffiths (1909) y Turpin y Gill (1928) - atribuían esta teoría a la facilidad con la que crece el nopal en virtualmente cualquier ambiente. Actualmente sabemos que esto es.

DISEÑO Y ESTABLECIMIENTO DE HUERTAS

La planeación cuidadosa es crucial para establecer una plantación comercial de nopal tunero y se tiene que tomar decisiones importantes previas a la plantación. Entre los aspectos a considerar se anotan:

- condiciones climáticas y microclima del sitio de plantación,
- análisis físico y químico del suelo.
- selección de la variedad,
- preparación del suelo,
- compra del material de propagación,
- diseño de barreras rompevientos,
- determinación del marco de plantación y orientación de las hileras, e
- instalación de sistema de riego.

Selección del sitio

La distribución mundial del nopal es un indicador de su amplia adaptabilidad a varios factores de clima y suelo (Brutsch, 1979). Las plantas de nopal pueden tolerar temperaturas muy altas sin consecuencias negativas (Nobel *et al.*, 1986); por otro lado, los sitios de plantación donde las temperaturas mínimas bajan de -5° C deben de evitarse, ya que la mayoría de los cultivares no toleran a estas temperaturas (Inglese, 1995). Los sitios bajos donde ocurren heladas invernales o de inicio de primavera se asocian con aborto de flores (Wessels, 1988b; Inglese, 1995; Nerd y Mizrahi, 1995a) y falla parcial o total del cultivo. El rango de temperatura diurna/nocturna óptimo para la absorción de CO₂ del nopal es de 25/15° C, cualquier variación positiva o negativa reduce la absorción de CO₂ y consecuentemente conduce a bajo crecimiento y producción. (Nobel, 1984; Nobel y Bobich, 2002). El patrón de temperatura durante la emisión de flores (al final del invierno o la primavera) y durante el desarrollo de fruto (PDF) tiene un efecto significativo en la producción y calidad de frutos. La mayoría de las Opuntias están deficientemente adaptadas a periodos largos de clima húmedo y fresco (Brutsch, 1979).

En la mayoría de los países caracterizados por lluvias en verano, el nopal es cultivado bajo condiciones de temporal, sin embargo se requiere el riego cuando la estación seca del año coincide con el PDF o cuando la lluvia anual es menor de 300 mm (Inglese, 1995). El nopal es cultivado con éxito en áreas con lluvia invernal cuando se provee riego durante los meses calientes y secos del verano. El límite máximo de lluvia anual es de 1000 mm (Le Houerou, 1992, 1996a), pero la lluvia abundante no es ideal dado que puede ocasionar po-

linización deficiente. Alta incidencia de enfermedades fúngicas, agrietamiento de frutas y reducción de la calidad de la fruta (Wessels, 1989).

Dada la succulencia de la planta y la fruta, esta es dañada fácilmente por el granizo, y la producción comercial debe ser evitada en aquellas áreas con alta ocurrencia de estos meteoros (Wessels, 1988a; Brutsch, 1979a). El daño físico resultante del granizo facilita la entrada de hongos patógenos a la planta (Granata, 1995; Swart *et al.*, 2003), y causa daños cosméticos inaceptables en la fruta comercial.

Snyman (2004, 2005) mostro que a los dos años las raíces de *O. ficus-indica* representan únicamente el 7% de la biomasa de la planta - un indicador de la gran diferencia entre la parte subterránea y la biomasa aérea- en los primeros años de crecimiento de la planta. Como resultado, los vientos fuertes seguidos de lluvia pueden causar el colapso de las plantas, especialmente cuando son jóvenes y las raíces no se han desarrollado completamente para soportar la posición vertical de la planta.

Es importante examinar las características del microclima al momento de seleccionar el sitio de plantación para establecer la huerta. Por ejemplo, los terrenos orientados al norte son más calientes que los orientados al sur (en el hemisferio sur), lo que resulta en cosechas más tempranas y mejor calidad de fruta.

Dado que el nopal crece en un amplio rango de suelos (Inglese *et al.*, 2002a), es importante seleccionar los mejores suelos disponibles para alta productividad (Wessels, 1989a). Los suelos con texturas arenosas a arena limosas son los ideales (Vázquez Alvarado *et al.*, 2006), pero el nopal también puede crecer bien en suelos más pesados (Wessels, 1988b), pero el factor importante es el drenaje del suelo más que la textura del mismo. El nopal es muy sensible a la falta de oxígeno en el suelo (Brutsch, 1979; Le Houerou, 1992; 1996a), pero los suelos arenosos son muy susceptibles a la lixiviación de nutrientes (Wessels, 1988a). La planta prefiere pH neutrales a ligeramente alcalinos (agua) (Wessels 1988b; Zegbe *et al.*, 2015). El suelo seleccionado para la plantación debe poseer una profundidad mínima de 300 mm (Wessels, 1986a), aunque suelos más profundos (600-700 mm) son preferidos para la producción comercial (Inglese *et al.*, 2002 a). La mayoría de las Opuntias no toleran ni siquiera niveles moderados de sales disueltas en la zona de raíces. Dado que la absorción neta de CO₂ es inhibida, esta afecta negativamente el crecimiento de los nopales en suelos con alto contenido de cloruro de sodio o carbonato de calcio (Nobel, 1994, 1995). Gersani *et al.* (1993) reportaron una reducción de hasta el 40% en el crecimiento de la planta con una concentración de 30 mol m⁻³ (1.76 L⁻¹ NaCl) y una reducción del 93% con una concentración de 100 mol m⁻³ (5.85 g L⁻¹ NaCl).

Preparación del suelo

La preparación del suelo con anticipación a la plantación es esencial para el éxito de una plantación de nopal tunero y no puede ser realizada adecuadamente si se realiza posterior a la plantación. El desmonte del terreno y la nivelación pueden ser requeridos en ocasiones (Inglese, 1995); las líneas para el riego suplementario pueden ser instaladas y las hileras de plantación marcadas. En áreas donde existe fauna silvestre y animales domésticos es común el daño a las plantas jóvenes, por lo que el cercado es indispensable.

Las condiciones adversas de suelos, tales como capas impenetrables, infestación de malezas perennes y escasa profundidad de suelos deben de ser atendidas antes de la plantación (Wessels, 1988b; Inglese *et al.*, 2002a). La labranza profunda del suelo (al menos 500 mm) con subsolador o cindeles sobre la línea de plantación es necesaria para romper las capas duras, y mejorar el drenaje, aumentar la aireación y a capacidad de almacenamiento de agua. En suelos pesados y compactados, la labranza profunda en forma cruzada puede también ser benéfica, ya que ayuda a la sobrevivencia de la planta durante los años de lluvia escasa cuando la planta puede utilizar el agua de capas más profundas (Inglese, 1995; Potgieter, 2001). En suelos muy delgados se recomienda el surcado (Singh, 2003). Es importante remover las malezas perennes antes del establecimiento - ya sea por medios mecánicos o químicos-ya que representaran fuerte competencia durante las primeras etapas del crecimiento de la planta (Wessels, 1988b).

Fertilización previa a la plantación

Las enmiendas de suelo para corregir desbalances de nutrientes y el pH del suelo deben ser realizadas antes de la plantación. Un pH del suelo (en agua) en el rango de 6.5-7.5 es considerado como óptimo (Wessels, 1988a, b; Singh 2003). Las aplicaciones de fertilizantes deben basarse en los resultados de los análisis de suelos, que indicaran los niveles de nutrientes en el suelo (**Tabla 1**).

TABLA 1

Niveles óptimos de nutrientes de los suelos sugeridos para la producción de nopal tunero de temporal en áreas con lluvias de verano en Sudáfrica.

Elemento	Nivel óptimo en suelo (mg kg ⁻¹)
P	20-30
K	80-100
Ca	> 400
Mg^a	100-150

^a El nivel de Mg no debe ser superior al nivel de Ca.

Adaptado de Potgieter, 2001, 2007.



Es necesario coleccionar muestras de suelo representativas de la capa superior (0-300 mm) y del subsuelo (300-600 mm) para análisis químico y físico. Los efectos secundarios del pH del suelo sobre la disponibilidad de nutrientes es probablemente más importante que el pH del suelo por sí mismo. Por ejemplo, el P se hace menos disponible para las plantas a bajo pH (Nobel, 1988). El calcio y el fósforo son relativamente inmóviles en el suelo y como resultado esta deben mezclarse perfectamente antes de la plantación. La salinidad el suelo además de reducir el crecimiento y la acumulación de materia seca (Berry y Nobel, 1985) también reduce el contenido de agua del cladodio, la absorción de K y Ca, y la proporción raíz/tallo (Nerd *et al.*, 1991c). La adición de yeso ayuda a neutralizar el exceso de sales de la solución del suelo. El nopal reacciona muy bien a los abonos orgánicos, los cuales también mejoran la estructura del suelo. El contenido de nutrientes y la capacidad de almacenamiento de agua (Inglese, 1995; Singh, 2003). Como regla general, se sugiere incorporar entre 6 y 10 ton ha⁻¹ de abono animal bien composteado, incorporándolo perfectamente en el suelo antes de la plantación.



Barreras rompevientos

En regiones con mucho viento, es conveniente la plantación de barreras vivas que minimizan los efectos negativos del viento en las huertas de nopal. Las lluvias intensas acompañadas de fuertes vientos pueden causar el colapso de plantas jóvenes y aun causar roturas de ramas y cladodios (Felker *et al.*, 2005). La polinización y la aspersión de agroquímicos pueden ser afectados por vientos fuertes; es difícil también llevar a cabo otras labores de manejo e huertas (poda, raleo de fruta y cosecha) en esas condiciones, dado que las gloquidas tienden a separarse de los cladodios y volar (Wessels, 1989). Cuando los cladodios y los frutos se forman y crecen apretados en los cladodios los frutos se dañan con el roce mutuo causado por el viento. Las barreras vivas deben ser adaptadas al área de plantación y deben recibir agua y nutrientes para asegurar que no compitan con el cultivo. Una especie arbórea popular para este propósito es la casuarina australiana (*Casuarina* spp.).

Selección de la variedad

El número de variedades de nopal tunero disponible varía significativamente entre países. México y Sudáfrica poseen numerosos cultivares, mientras que la mayoría de los otros países productores de tuna poseen un número limitado de ellos. La selección del mejor cultivar para fruta depende principalmente de las condiciones de clima del sitio y de la demanda del mercado. Las especies y variedades de nopal difieren significativamente en relación a su potencial de rendimiento, caracteres de calidad y adaptación a áreas específicas; de hecho, la mayoría de los cultivares exhiben una fuerte interacción genotipo x ambiente (GxE) (Potgieter, 2007). Las variedades deben de seleccionarse cuidadosamente ya que la sustitución tardía por otra variedad implica grandes costos, debido a que los propagulos son autoenraizados y la injertación no es económicamente viable.

Asimismo, las características de las variedades deben ser consideradas cuidadosamente (**Tabla 2**) antes de tomar la decisión final, debe de examinarse la preferencia de los mercados en particular. Por ejemplo, lo cultivares de pulpa roja, rosa, amarilla o naranja son preferidos en el mercado Europeo y Americano, mientras que los de color blanco o verdoso son favorecidos por los consumidores sudafricanos (Weseels, 1988) y mexicanos (Mondragon Jacobo y Perez Gonzalez, 1994 y 1996). Si los productores esperan exportar su fruta, la selección apropiada de la variedad es aún más importante, ya que las características tales como apariencia, resistencia al manejo postcosecha y vida de anaquel juegan un papel crucial en el éxito de las exportaciones. Los productores deben considerar también que algunas de las características importantes de las variedades pueden ser influenciadas por el ambiente y las prácticas de manejo de la huerta. Por ejemplo, aunque el peso de la fruta está controlado genéticamente, este puede ser influenciado por el raleo de fruta, el riego, fertilización y poda. La variación anual en el rendimiento de fruta y la calidad es también evidente en las huertas comerciales.

TABLA 2 Principales variedades de países productores de tuna del mundo.

Variedad	País	Especie	Con/sin espinas	Color cascara/pulpa (al 50%)	Tiempo de cosecha	Peso de la fruta (g)	Pulpa (%)	TSS (°Brix)	Tolerancia a manejo postcosecha
Algerian	SA	<i>O. ficus-indica</i>	Sin	Rojo/rosa oscuro	Jul./Ago.	162	59.4	13.9	Moderada
Gymno Carpo	SA	<i>O. ficus-indica</i>	Sin	Amarillo/ naranja	Ago./Sep.	170	61.7	11.2	Moderada
Meyers	SA	<i>O. ficus-indica</i>	Sin	Rojo/rosa oscuro	Jul./Ago.	176	60.7	13.6	Buena
Morado	SA	<i>O. ficus-indica</i>	Sin	Verde/blanco	Jul./Ago.	146	60.0	14.4	Pobre
Nudosa	SA		Escasas	Rojo/rojo	Ago./Sep.	236	60.8	11.2	Buena
Roedtan	SA	<i>O. ficus-indica</i>	Sin	Amarillo/ naranja	Ago./Sep.	171	60.7	14.2	Moderada

(Continua)

Variedad	País	Especie	Con/sin espinas	Color cascara/pulpa (al 50%)	Tiempo de cosecha	Peso de la fruta (g)	Pulpa (%)	TSS (°Brix)	Tolerancia a manejo postcosecha
Turpin	SA	<i>O. ficus-indica</i>	Sin	Amarillo/ naranja	Jul./Ago.	181	55.0	13.6	Moderada
Zastron	SA	<i>O. ficus-indica</i>	Sin	Verde claro/blanco	Jun./Jul.	137	57.2	13.5	Buena
Reyna	México	<i>O. albicarpa</i>	Con	Verde claro/ verde claro	Jul./Ago.	120	63.7	16.4	Pobre
Cristalina	México	<i>O. albicarpa</i>	Con	Verde claro/ verde claro	Ago./Sep.	207	60.2	12.7	Buena
Villanueva	México	<i>O. albicarpa</i>	Con	Verde/ verde claro	Jun./Jul.	129	60.9	14.4	Pobre
Burrona	México	<i>O. amyclaea</i>	Con	Verde claro/ verde claro	Sep./Oct.	217	59.8	12.7	Muy buena
Roja San Martin	México	<i>O. ficus-indica</i>	Escasas	Rojo morado/ morado	Jul./Aug.	116	44.5	13.7	Pobre
Naranjona	México	<i>O. megacantha</i>	Escasas	Amarillo/ naranja	Ago./Sept.	170	51.7	13.1	Muy buena
Roja Vigor	México	<i>O. ficus-indica</i>	Sin	Rojo brillante/ rojo	Jul./Ago.	174			Moderada
Dellahia	Marruecos	<i>O. robusta</i>	Sin	Verde claro/ verde claro		100	53.1	14.0	Moderada
Moussa	Marruecos	<i>O. ficus-indica</i>	Sin	Amarillo/ naranja	Dic.	101	51.0	14.4	Moderada
Aissa	Marruecos	<i>O. ficus-indica</i>	Sin	Amarillo/ naranja		96	50.0		Moderada
Gialla	Italia	<i>O. ficus-indica</i>	Sin	Amarilla		103	51.0	13.0	Buena
Rossa	Italia	<i>O. ficus-indica</i>	Sin	Roja					
Bianca	Italia	<i>O. ficus-indica</i>	Sin	Blanca		112	53.6		
Amarilla sin Espinas	Argentina	<i>O. ficus-indica</i>	Sin	Amarillo/ verde				13.9	
Ofer	Israel	<i>O. ficus-indica</i>	Sin	Amarillo/ naranja					
Andy Boy	EUA	<i>O. ficus-indica</i>	Sin	Blanca/amarilla/roja					
Verde (Criolla)	Chile	<i>O. ficus-indica</i>	Con	Verde/ verde	Feb.-Abr.	132	49.6	13.3	Buena

SA = Sudáfrica; *50%: Toma de color en frutos con el 50% de madurez. TSS: Total de Sólidos Solubles

DISEÑO DE LA HUERTA

Orientación de las hileras

A diferencia de la densidad de plantación, la orientación de las hileras no puede ser cambiada y quedará fija durante toda la vida de la huerta. De acuerdo con Nobel (1982), los cladodios de nopal tienen la tendencia a orientarse este-oeste, excepto a bajas latitudes (<27°) y en áreas donde el crecimiento vegetativo ocurre en el invierno. En estas situaciones, la orientación de las hileras es menos importante. Una vez que la orientación de las hileras se ha decidido, es importante optimizar la utilización de la luz de la copa completa de la planta durante el día (García de Cortázar y Nobel 1991; Stassen *et al.*, 1995). Es generalmente aceptado que la orientación norte-sur de las hileras capturan la misma radiación solar en condiciones de días nublados y soleados, esto puede ser adaptado para ajustarse a la latitud, el sitio y la incidencia de quemaduras de sol. Existen otras consideraciones prácticas, tales

como terrenos en pendiente, en los cuales se recomienda plantar siguiendo el contorno para prevenir la erosión del suelo (Inglese, 1995; Stassen *et al.*, 1995).

Sistemas de plantación

La selección del marco de plantación depende del tamaño del terreno, manejo del sitio, implementos, clima, fertilidad del suelo, hábito de crecimiento de la variedad, método de conducción de la planta y presencia de plagas tales como la cochinilla (Wessels, 1988b; Inglese, 1995).

Seto

Existen varios sistemas de plantación que pueden ser usados para la producción de tuna, pero en años recientes, las plantaciones a alta densidad en setos sobre diseños rectangulares están prevaleciendo en huertas comerciales grandes de Sudáfrica (Unterpertinger, 2006)), Israel (Nerd y Mizrahi, 1993), California EUA



(Bunch, 1996) y Argentina (Felker y Guevara, 2001). Los setos tienen la ventaja de menores costos de insumos. También permiten aspersiones con mayor cobertura, y se maximiza la captura de radiación solar, resultando en mayor productividad.

Diseños rectangulares (plantas individuales)

En Italia los nopales son plantados en espaciamentos amplios con diseño cuadrangular o rectangular; pero en Israel e Italia se han reportado rendimientos de fruta similares bajo diferentes espaciamentos (Inglese *et al.*, 1995a).

Espaciamentos

La distancia de plantación de huertas de nopal tunero es muy variada, dependiendo del hemisferio, país y ambiente. En Italia, las distancias de plantación son generalmente amplias y varían de 6 x 6m (278 plantas ha⁻¹) a 4 x 6m (416 plantas ha⁻¹) (Inglese *et al.*, 2002 b; Tudisca *et al.*, 2015). En otras partes del Mediterráneo, la distancia entre plantas es más corta. Por ejemplo en Israel se usan 1.5m entre plantas y 4m entre hileras (1666 planta ha⁻¹) para obtener rendimientos altos durante la primera etapa de la vida de la huerta (Nerd y Mizrahi, 1993). En Jordania se han reportado rangos de densidad de plantación entre 500 y 2000 planta ha⁻¹, con distancias entre plantas de 1-2m y entre hileras de 4-6m, usualmente ubicados siguiendo curvas de nivel (Nasr, 2015). En California se usan 1.5m entre plantas y 4-6m entre hileras (830 a 1 666 plantas ha⁻¹) (Bunch, 1996). En plantaciones grandes de México, las plantas son colocadas a 4 x 5m o 500 plantas ha⁻¹ (Pimienta Barrios, 1990). En el hemisferio sur, la mayoría de las huertas nuevas de Sudáfrica están establecidas a 2x5m a 2x4m (1000 a 1250 plantas ha⁻¹) y conducidas en el sistema de setos. Targa *et al.*, (2013) reporto que en Argentina se usan distancias de 1.5m entre plantas y 6m entre hileras (1 111 plantas ha⁻¹) colocadas en setos continuos.

Cualquiera que sea el espaciamento utilizado, es importante mantener abierto el espacio para el movimiento de la maquinaria agrícola entre hileras, el cual es 1.8 para la maquinaria agrícola (Wessels, 1988 b; Gittens, 1993).

Plantaciones a alta densidad

Un problema generalizado del cultivo de nopal tunero ocurre cuando se permite que las plantas crezcan sin control, alcanzando gran tamaño y convirtiéndose en "bosques" más que huertas productivas. Grandes porciones de estas plantas, especialmente las partes bajas son sombreadas completamente (Liguori e Inglese, 2015). Como resultado, el amarre de fruta es limitado a la parte exterior de la planta y los costos de cosecha se

incrementan, debido al incremento continuo del precio de la tierra y los insumos de la producción. Es necesario reevaluar seriamente los sistemas de plantación, la densidad y el manejo de la planta en relación al rendimiento y calidad de la fruta (Stassen *et al.*, 1995; Liguori e Inglese, 2015). Las plantaciones a bajas densidades no se justifican económicamente, al respecto, existen dos tendencias:

- **plantar nopal a escala intensiva y remover plantas cuando ocurra el entrecruzamiento de ramas.** El objetivo es obtener rendimiento alto durante los primeros años. La plantación densa sobre las hileras (1-1.5 m) maximiza el rendimiento durante los primeros años de la plantación, pero resulta en sombreo excesivo después de unos pocos años. Por lo tanto, la poda y remoción de plantas a cada determinado tiempo es necesaria para evitar la reducción del rendimiento y la calidad de fruta (Inglese *et al.*, 1995 a; Inglese *et al.*, 2002a). Barbera e Inglese, (1993) recomiendan usar más plantas por sitio de plantación y espaciarlas a 4m entre ellas, lo que resulta en un incremento rápido de la copa (SAI o Stem Area Index). Así se obtienen plantas que producen más en los cladodios externos. Sin embargo, las plantas alcanzan rápidamente alturas de 3-3-5m y anchuras de 4-4.5m, asociadas a altos costos de poda y cosecha (Inglese *et al.*, 1995a). además del problema del sombreo excesivo, la copa densa también ayuda a las infestaciones de cochinilla y reducen la eficiencia del control de plagas (Inglese, 1995 b). altas densidades de plantación también producen altos rendimientos (>30 ton ha⁻¹) en plantas de 3 años; sin embargo, ocurre más crecimiento vegetativo que reproductivo conforme la planta envejece (García de Cortázar and Nobel, 1992).
- **Plantar los nopales de acuerdo a una densidad de plantación realista y utilizar sistemas de manejo de la planta que la formen y contengan el tamaño dentro del espacio designado** (Stassen *et al.*, 1995). El espaciamento corto dentro de las hileras maximiza el rendimiento de fruto en plantas jóvenes mientras que el número de cladodios fértiles por unidad de área se incrementa (Inglese *et al.*, 2002a). Este enfoque es dependiente del uso de técnicas de manipulación para mantener un volumen específico por planta. La altura de la planta no debe rebasar el 80% de la anchura entre hileras para evitar sombrear las partes bajas del seto (Stassen, *et al.*, 1995), que provoca que estas áreas sean menos fructíferas. Si el manejo de la planta es realizado anualmente, esta estrategia es más eficiente que el uso de bajas densidades de plantación. Sin embargo si por alguna razón no se puede ejecutar este manejo, es recomendable mantener una baja densidad de plantación.



ESTABLECIMIENTO

El enraizamiento de los cladodios y el crecimiento vegetativo subsecuente en el campo depende de muchos factores. Observaciones de campo realizadas en muchas huertas comerciales han revelado un alto grado de variabilidad a pesar del uso de propagulos vegetativos (Brutsch, 1979; Wessels, 1988a), lo que indica la necesidad de una selección cuidadosa del material de plantación.

Selección y preparación del material de plantación

El nopal tunero es propagado principalmente por partes vegetativas para asegurar fidelidad al tipo (Wessels, 1988b). Donde los agricultores no tienen sus propias plantas de nopal es aconsejable ordenar material vegetativo con suficiente anticipación de productores que tengan material vegetal de buena calidad, tanto cladodios sencillos como ramas son usadas para el establecimiento de huertas de nopal alrededor del mundo.

Cladodios individuales

Se puede usar cladodios individuales de uno a dos años de edad aunque los de un año desarrollan más raíces largas que las de dos años (Arba, 2009b). En general se deben seleccionar cladodios obtenidos de las partes terminales de la planta, maduros, grandes, visualmente libres de cualquier defecto, insectos o enfermedades (Potgieter, 2007). Según Barbera et al. (1993b) y Wessel et al., (1997) el área y peso seco de un cladodio tiene influencia significativa sobre el enraizamiento exitoso y la brotación en el campo, una área de 500 cm² con un peso seco de 70 a 100 gramos permite un buen crecimiento de la planta. Inglese (1995) recomienda colocar dos cladodios paralelos separados a 0.4 metros en cada sitio de plantación para un rápido desarrollo de la copa, o de manera alternativa 3 o 4 cladodios individuales colocados en triángulo o cuadrado y separados a 0.3 m. Aunque este método tiene sus ventajas en un desarrollo rápido de la copa, resulta en espaciamiento más anchos dentro de la hilera y requiere grandes cantidades de material de plantación (Inglese, 1995; Mondragon Jacobo y Pimienta Barrios, 1995), los cladodios individuales como unidad de plantación tienen la ventaja de bajos costos de transporte y facilidad de manejo durante la plantación.

Cladodios múltiples o brazos

El nopal también puede ser propagado usando cladodios maduros que posean a su vez uno o más cladodios; esta es una práctica común en Sicilia donde se usan ramas que tiene dos o tres cladodios de un año (Tudisca et al., 2015). La mayor parte del cladodio basal es enterrado para asegurar la estabilidad de la planta (Inglese, 1995). El método de brazos permite un desarrollo más rápido

de la planta y fructificación más temprana que el uso de cladodios simples (Homarani Bakali, 2013; Nars, 2015). Sin embargo debido al tamaño y peso son más difíciles de manejar y transportar. Los cladodios pueden ser curados durante 4 o 6 semanas a media sombra sobre una superficie seca para permitirles que cicatricen las heridas del corte (Potgieter, 2001; Inglese, 2002a). Alternativamente se pueden usar fungicidas a base de cobre que se utiliza para tratar la zona del corte (Inglese, 1995). Para prevenir la introducción de insectos dañinos (e. g. cochinillas y palomilla del nopal) a nuevas áreas de plantación, es recomendable desinfectar los cladodios cuidadosamente antes de la plantación con un insecticida registrado. Las etapas inmaduras de la cochinilla apenas son perceptibles a la vista, por lo cual si no se tiene cuidado se puede introducir en áreas donde no existía con consecuencias potencialmente devastadoras. Los cladodios deben ser lavados con una mezcla de insecticidas usando un cepillo suave para destruir cualquier insecto.

Profundidad y métodos de plantación

En suelos arenosos los cladodios deben ser plantados más profundo que en suelos pesados para que permanezcan erectos; asimismo los cladodios pequeños deben ser colocados más profundo para garantizar un mejor enraizamiento. Hay tres maneras de plantar nopales: erectos; inclinados en un ángulo de 30 a 45° o acostados.

La posición **erecta** es la más común (Inglese, 1995) y es preferida para la producción de fruta, los cladodios son plantados de manera vertical con el corte apuntando hacia el suelo. Las plantas enrizan rápidamente desarrollando una planta fuerte (Arba, 2009b; Arba y Bernachird, 2013). Los cladodios deben ser acomodados de modo que sus caras apunten hacia la hilera. Para ser un contacto apropiado entre el cladodio y el suelo este debe ser apisonado firmemente después de plantarlo. La única desventaja de este método de plantación es la posible pudrición del corte basal (Wesseks, 1988b).

Época de plantación

La raíz de los cladodios alcanza su máxima tasa de crecimiento durante el final de la primavera y el principio del verano (Wessels, 1988b). En áreas con lluvias en verano los cladodios recién plantados se beneficiaran con las lluvias que ocurren después de la plantación (Pimienta Barrios, 1990; Singh, 2006). La plantación puede extenderse hasta la mitad del verano que presenta inviernos moderados. La idea es que la planta esté bien establecida y sobreviva las condiciones de invierno. Sin embargo en Marruecos (Nars y Jamjoum, 2002; Nars, 2015) y Jordania (Homrani Bakali, 2013) se recomienda la plantación en otoño, dando como resultado un sistema radicular bien establecido en invierno, así como un fuerte crecimiento en verano y producción temprana de fruto.



Cuidado de cladodios recién plantados

Se puede aplicar uno o dos riegos ligeros (10L x planta⁻¹) en un pequeño cajete que se construye alrededor de la planta para promover desarrollo de raíces. Pero se tiene que tener cuidado de no regar en exceso a las plantas jóvenes (Potgieter, 2001). Los cladodios recién establecidos pueden desarrollar frutas poco tiempo después de plantados. Debido a las altas demandas que estos frutos ponen sobre la planta, es mejor eliminarlos durante el primer año de establecimiento (Wessels 188b; Inglese, 1995) durante el primer año de producción se puede dejar madurar una cosecha ligera.

MANEJO DE LA HUERTA

Control de malezas

Se sabe que el nopal está bien adaptado a las zonas áridas y semiáridas y que puede sobrevivir a condiciones de sequía severa, y se ha mostrado que el control de malezas mejora la productividad (Felker y Rusell, 1988), especialmente en plantaciones jóvenes (Inglese *et al.*, 1995a). La sensibilidad de la planta a la competencia de malezas es debida a su sistema radicular superficial (Felker y Rusell, 1988; Snyman, 2005), ya que compiten en el mismo nivel de suelo por los nutrientes y agua. Según Nobel y De la Barrera (2003) el 95% de las raíces de una planta madura de nopal se desarrolla a una profundidad de suelo 40-440 mm, mientras que Snyman (2006a) reporta que las raíces se pueden extender hasta 2.5 metros de la base del tallo de la planta en dos años. Se pueden usar varios métodos de control de malezas, entre ellas la labranza del suelo, pero esta debe restringirse al mínimo, para evitar dañar el sistema de raíces superficiales (Inglese, 1995). El control de maleza debe realizarse cuando la hierba esta joven y que compite menos con el nopal (Wessels, 1988a; Inglese, 1995).

Control químico de maleza

Due to high labour costs, chemical weed control is the. Debido a los altos costos de la mano de obra el control químico es la norma en la producción comercial de tuna. Existe una amplia variedad de herbicidas que pueden ser usados, pero los agricultores deben usar solamente los productos registrados en sus respectivos países, especialmente cuando la fruta es producida para la exportación. Las malezas deben de ser controladas en una franja de 1-1.5 m a ambos lados de la línea de plantación (Potgieter, 2001); donde el peligro de erosión es menor se puede ampliar a la totalidad del espacio entre hileras (Brutsch, 1979; Felker *et al.*, 2005). Las aplicaciones de herbicidas no deben de llevarse a cabo en días con vientos fuertes, ya que el nopal es muy sensible al daño por herbicidas. Cuando las partes bajas del nopal están

verdes - todavía contienen clorofila - deben de cubrirse durante la aspersión para evitar daños del herbicida.

Control mecánico de maleza

Este tipo de control de la maleza presente entre las hileras es preferido en el sistema de plantación en setos, especialmente cuando las plantas están jóvenes, debido a su sensibilidad a los herbicidas (Potgieter, 2007). Sin embargo en huertas con marcos de plantación cuadrangulares y con plantas individuales formadas en forma de globo, el control de maleza se realiza manualmente, debido a que en este sistema es difícil trabajar los espacios entre hileras con los implementos agrícolas comunes (Inglese y Barbera, 1993). En sistemas agrícolas tradicionales o de pequeña escala con acceso limitado a herbicidas, el suelo entre las hileras puede ser arado para limpiarlos de malezas (Nasr, 2015; Tudisca *et al.*, 2015). Aunque el control mecánico no es el ideal, es mejor que no realizar ningún control (Felker y Rusell, 1988).

Bandas permanentes de pasto

En aquellas huertas plantadas en terrenos con pendiente, es recomendable la poda regular de la banda de pasto que se genera entre hileras para prevenir la erosión (Potgieter, 2001). Las malezas pueden podarse y dejarse como residuo verde sobre la superficie del suelo, lo cual ayuda a retener humedad y reducir el crecimiento de las malezas (Inglese, 1995).

Sistemas de conducción y poda de plantas

La selección de un método apropiado de poda y conducción de las plantas está muy relacionada con el sistema de plantación, el marco de plantación y el espaciamiento seleccionado durante la fase de planeación de la huerta. La razón principal de la poda del nopal es para asegurar la intercepción del máximo de radiación fotosintéticamente activa (RFA) por los cladodios terminales. La mayoría de los cladodios terminales expuestos a suficiente luz solar producirán botones florales (Nerd y Mizrahi, 1995b), mientras que los cladodios sombreados usualmente cargan pocas flores o son infértiles totalmente (Wessels, 1988a; Pimienta Barrios, 1990; Inglese *et al.*, 2010). Por lo tanto para asegurar alta absorción de CO₂ y fertilidad de cladodios, es importante prevenir el sombreado excesivo de los cladodios (Pimienta Barrios, 1990; Inglese *et al.*, 1994 a) particularmente durante las últimas 8 semanas antes del inicio de la brotación de primavera (Barbera *et al.*, 1993a); Cicala *et al.*, 1997). Otros beneficios de la poda incluyen; control del tamaño de la planta, formación de la planta como un seto, incremento de la producción de fruta, mejoramiento del tamaño de fruto, asimismo facilita la detección y control de plagas, facilita de cosecha y rejuvenecimiento de plantas viejas (Hester y Cacho, 2003; Inglese *et al.*, 2009, 2010). Entre el 20 al 30% de los cladodios terminales deben



de ser removidos por la poda (Oelofse *et al.*, 2006). Sin embargo, la poda excesiva reducirá el rendimiento y contribuirá a reforzar el crecimiento vegetativo de la siguiente temporada (Inglese *et al.*, 2002b). Finalmente todos los cladodios enfermos, dañados o pequeños deben de ser removidos durante la poda.

Poda de formación

La poda formativa empieza el primer año de establecimiento y es substituida por la poda de producción cuando la planta comienza a producir (Targa *et al.*, 2013; Nasr, 2015). El objetivo de la poda es dirigir el crecimiento vegetativo hacia la obtención de la forma deseada de planta. En países donde se usa la formación de seto en alta densidad, las plantas son podadas en forma piramidal (Potgieter, 2001) en aquellos donde se usan marcos de plantación rectangulares, es común usar espaciamientos más amplios y se usan las formas de vaso o globo (Inglese, 1995). Estas plantas no presentan tallos principales, lo cual resulta en plantas grandes con un alto número de cladodios terminales distribuidos alrededor de la porción exterior de la copa (Inglese *et al.*, 2002a).

Poda de producción

Esta poda es útil para mantener un buen balance entre crecimiento vegetativo y reproductivo, con un número adecuado de cladodios terminales nuevos para la floración del año siguiente (Mulas y D'Hallewin, 1992). La densidad de la copa de la planta de nopal es afectada por las condiciones ambientales, habito de crecimiento de la variedad y distancias de plantación (Inglese *et al.*, 2002a). La reducción de la densidad de la copa por medio de la poda facilita el manejo de la huerta (e. g. raleo de fruta, *scozzolata*, cosecha) y contribuye a mejorar la calidad de la fruta (Inglese *et al.*, 2002 a; 2010). De preferencia la altura de planta no deberá exceder de 1.8 m, para evitar el uso de escaleras para llevar a cabo las prácticas de manejo de la planta (Potgieter, 2001; Nasr, 2015).

Poda de rejuvenecimiento

En el caso de plantaciones viejas de nopal, la senescencia de la copa y la reducción del rendimiento son notables, así como la producción alternada (Mulas y D'Hallewin, 1992). El rejuvenecimiento de plantas viejas puede conseguirse podando la planta a una altura de 0.5m por encima del nivel del suelo.

Se deben de dejar únicamente 3-4 ramas principales bien espaciadas para el desarrollo correcto de la nueva planta. Para prevenir quemaduras de sol, la planta completa debe ser cubierta con pintura vinílica blanca, mezclada 1:1 con agua. Dado que la planta posee un sistema radicular bien establecido, reinicia la producción en 2-3 años después de la poda de rejuvenecimiento (Wessels, 1988b; Mulas y D'Hallewin, 1992). Los nuevos cladodios recién desarrollados deben de ralearse para evitar la competencia entre ellos.

Poda de verano

La remoción completa de los nuevos cladodios en desarrollo en la primavera para reducir la competencia entre el crecimiento de fruta y vegetativo es una labor común en Sicilia. Sin embargo, esta práctica puede resultar en alternancia de la producción (Inglese y Barbera, 1993; Inglese *et al.*, 2002b). La poda de verano no es recomendable en regiones con inviernos fríos, debido a que los cladodios desarrollados tardíamente no tienen tiempo suficiente para endurecerse antes de que llegue el invierno y podrían ser dañados por las heladas (Wessels 1988b). Sin embargo en Sudáfrica, se realiza el raleo de algunos de los cladodios en la primavera e inicios del verano. Los cladodios jóvenes que crecen muy cerca de los frutos pueden causar rozaduras en la epidermis de la fruta, con lo cual pueden perder aceptación en el mercado debido a este daño cosmético (Wessels, 1988b; Potgieter, 2001).

La mejor época para podar es después de la cosecha, aproximadamente dos meses antes de la emergencia de las nuevas yemas florales (Wessels, 1988b). La poda tardía, especialmente de plantas muy densas puede resultar en exposición deficiente a suficiente radiación fotosintéticamente activa para hacerlos fértiles. En Sudáfrica la poda se realiza de abril a julio (otoño/invierno), cuando la planta no está creciendo activamente (Wessels, 1988c; Potgieter, 2001). De manera similar en México la poda se hace de noviembre a marzo (Invierno).

Fertilización

Las deficiencias de nutrientes minerales afectan el metabolismo de la planta de nopal con resultados negativos en el rendimiento y calidad de fruta (Nerd y Mizrahi, 1992; Zegbe Domínguez *et al.*, 2014). Para diseñar recomendaciones de fertilización de nopal tunero, es esencial considerar el estado nutricional de la planta en los cladodios nuevos y la disponibilidad de nutrientes en la reserva del suelo.

Los resultados disponibles sobre la nutrición del nopal y su efecto en el rendimiento y calidad de la fruta son altamente inconsistentes y contradictorios, lo cual hace muy difícil generar recomendaciones de fertilización. Los nopales tuneros difieren de la mayoría de las plantas, tanto morfológica como fisiológicamente, por esta razón, las recomendaciones disponibles para otras plantas son de poca utilidad (Nobel, 1983, 1988; Magallanes Quintanar *et al.*, 2006). En ausencia de información confiable sobre la fertilización del nopal, la **Tabla 3** provee normas de análisis amplias y provisionales de suelo y planta, mientras que la **Tabla 4** resume las guías generales de fertilización para aquellos casos en los cuales no se cuenta con resultados de análisis de suelos.



TABLA 3 Normas provisionales

Suelo (parámetro)	Norma	Cladodio terminal	Norma (%DM)
pH (agua)	6.5-7.5	N	^b
P (mg kg ⁻¹)	20-30	P	0.1-0.3
K (mg kg ⁻¹) ^a	80-100	K	1.5-4.0
Ca (mg kg ⁻¹)	> 400	Ca	2.0-4.5
Mg (mg kg ⁻¹)	100-150	Mg	1.0-1.5
Na (mg kg ⁻¹)	< 200	Na	0.02-0.03
Mn (mg kg ⁻¹)	30-70		
Ca/N	4.0		
K/N	3.4		
N/P	4.5		
Ca/Mg	3.0		

^a donde (Ca+Mg)/K>8

^b plantas jóvenes (0-2 años); 0.6-0.8%; plantas maduras (≥3 años); 0.9-1.3%.


 TABLA 4 Recomendaciones provisionales de fertilización para la producción de tuna donde no existen análisis de suelos (cantidades de nutrientes en kg ha⁻¹ año⁻¹)

Nutriente	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
N	50	50	70	100
P	10	10	20	30
K	20	20	30	50
Mg	10	10	20	40

La investigación sobre nutrición mineral del nopal en varios países muestra que la aplicación de fertilizantes, ya se orgánicos o inorgánicos, es generalmente beneficiosa para la producción de fruta. Los elementos nutrientes influyen la fenología vegetativa y reproductiva, el rendimiento y calidad de fruta, y los macroelementos tienen los mayores efectos en la producción de fruta (Zegbe Domínguez *et al.*, 2014; Arba *et al.*, 2015b). De todos los nutrientes, el N es el más limitante en el caso del nopal (Nobel, 1983) y las concentraciones más altas se encuentran en los cladodios fértiles jóvenes (Nobel, 1988). Sin embargo, las concentraciones altas de N (>2.2% en cladodios de 2 y 3 años de edad pueden resultar en crecimiento vegetativo excesivo con el consecuente costo más alto, reducción de la fertilidad del cladodio, pobre desarrollo de color del fruto y madurez irregular (Potgieter y Mkhari, 2000; Inglese *et al.*, 2000a). Los valores reportados de concentraciones de P y K en los tejidos varían de 0.06-0.3 a 0.06-3.5%, respectivamente (Nobel, 1983, 1988; Arba *et al.*, 2015b). El Ca y K son los elementos más abundantes en los cladodios, potencialmente más abundantes que el N (Galizzi *et al.*, 2004).

Adicionalmente el Mg puede alcanzar niveles 1.47% en cladodios jóvenes (Magallanes Quintanar, 2006). Por lo tanto, N, P, K, Ca y Mg son potencialmente los factores limitantes en la producción de tuna, si es cultivada en suelos deficientes (Magallanes Quintanar, 2006). La concentración de nutrientes en los cladodios es afectada por la carga de frutos, posición de los cladodios, edad de la planta, tejido analizado y época del año. (Nerd y Nobel, 1995; Gugliuzza *et al.*, 2002a).

Es posible inducir un segundo flujo de flores por medio de la aplicación de N, justo después de la eliminación de las flores para la cosecha de verano. De acuerdo con Nerd *et al.*, (1993b), el número de nuevas flores incrementa si la dosis de N se aumenta hasta 120 kg N ha⁻¹ y la concentración de N en el tejido de los cladodios esta correlacionado positivamente con el número de flores formadas. Nerd y Mizrahi, (1995) encontraron que las flores del flujo de otoño es más alto en plantas jóvenes (<6 años) que en plantas viejas. Sin embargo, los sistemas de alta producción con dos cosechas en un año de la misma planta pueden tener requerimientos nutricionales adicionales (Groenewald, 1996).

Debido a la relación sinérgica entre la fertilización y el riego, la aplicación de fertilizantes debe realizarse cuando hay lluvia suficiente o cuando existe riego disponible (Nerd *et al.*, 1989; Mondragon Jacobo, 1999). En países con clima mediterráneo, la fertilización tiene lugar en el invierno (Barbera *et al.*, 1992), en Israel se provee fertirrigación durante todo el año (Nerd *et al.*, 1991b). Nerd *et al.*, (1989, 1991b) y Ochoa y Urhart (2006c) reportaron que la aplicación de NPK en invierno incremento la producción de botones florales en la primavera siguiente. Sin embargo de acuerdo con García de Cortázar y Nobel (1991), el mejor momento para aplicar los fertilizantes es durante los meses calientes debido a su mayor PPF (densidad de flujo de fotones fotosintéticos) del verano. En México se aplican la mitad del N y todo el P y K con riego al inicio de la brotación floral, y la mitad restante de N después de la cosecha (Zegbe Domínguez *et al.*, 2014). Bajo condiciones de temporal (lluvias en verano) la mitad del N y todo el P y K se aplican directamente después de la cosecha de fruta y el resto del N al final del mes de marzo (Wessels 1988b), mientras que el encalado se realiza en cualquier época del año, pero preferiblemente al menos 1 mes después de la aplicación de N (Claassens and Wessels, 1997).

Riego

La excepcional tolerancia a sequía y la alta eficiencia de uso del agua de las plantas de nopal (Han y Felker, 1997; Zegbe Domínguez *et al.*, 2015) son las razones principales de la popularidad del nopal como cultivo de temporal en muchas regiones del mundo que reciben poca lluvia y no poseen agua para irrigación. Aunque la planta puede sobrevivir en áreas que reciban 200 mm año⁻¹ (Acevedo *et al.*, 1983), el rango óptimo de lluvia para la producción de nopal tunero es de 400-600 mm de lluvia al año⁻¹, pero el tipo de suelo también juega un papel importante en el requerimiento real de agua (Le Houerou, 1992, 1994). Aunque se pueden conseguir rendimientos considerables de fruta con poca lluvia en condiciones de temporal (Potgieter, 2007), el riego suplementario es recomendable en aquellas áreas con lluvias en verano por debajo de 300 mm año⁻¹ (Mulas y D'Hallewin, 1997; Van der Merwe *et al.*, 1997). Asimismo, el riego durante periodos de clima desfavorables - sequías de verano, lluvias de verano tardías - es ventajoso (Wessels, 1986d). En un clima mediterráneo, donde la lluvia se recibe en el invierno, el riego suplementario es indispensable para obtener altos rendimientos y buena calidad (Mulas y D'Hallewin, 1997; Homrani Bakali, 2013). El riego del nopal es una práctica común en Italia, Israel, Jordania, Marruecos, Chile y en partes de Sudáfrica con lluvias de invierno.

La ventaja del riego suplementario de nopal tunero es definitiva, especialmente durante las fases críticas del crecimiento y desarrollo de la planta. Según García de Cortázar y Nobel (1992), y Mulas y D'Hallewin (1997) y Liguori

et al., (2013b) todos los reportes indican efectos benéficos del riego en el crecimiento vegetativo, número de cladodios y volumen de la copa. El rendimiento de fruta por planta es también generalmente más alto en plantas regadas que en plantas sin riego, y los investigadores lo atribuyen al mayor número de frutas por cladodio, más que a incremento del tamaño de fruto (Mulas y D'Hallewin, 1997; Mondragon Jacobo *et al.*, 1995).

De acuerdo con Nerd *et al.*, (1998) el retraso del riego durante el invierno cuando la lluvia es menor a 300 mm resulta en una reducción substancial de la fertilidad de los cladodios, la escasez de agua en el invierno, particularmente durante la fase de desarrollo del fruto (FDP) puede afectar adversamente la calidad del fruto. La aplicación de 2-3 riegos de 30-50 mm cada uno durante la FDP incrementa el tamaño de fruta y el porcentaje de pulpa del fruto (Barbera, 1984, 1994; Zegbe Domínguez *et al.*, 2015). Sin embargo el riego por sí solo no compensa el tamaño de fruta cuando el cladodio posee demasiados frutos, lo que hace que el raleo de fruta sea esencial para obtener fruta de buen tamaño (La Mantia *et al.*, 1998; Gugliuzza *et al.*, 2002a).

Nobel (1995) señaló que una lluvia mínima de 10 mm es adecuada para humedecer el suelo en la zona de raíces del nopal, como resultado la planta es capaz de usar eficientemente pequeñas cantidades de lluvia. Wessels (1998b), reportó que debido a que las raíces del nopal son superficiales, los riegos en cantidades mínimas de 20-25 mm a la vez pueden ser suficientes. Existe muy poca información sobre los parámetros de campo para programar los riegos, así la cantidad oportunidad y cantidad de agua aplicada varía substancialmente entre países (Felker e Inglese, 2003). Recientemente Consoli *et al.*, (2013) determinaron el factor de cultivo (Kc) del nopal tunero dentro del rango de 0.5-0.6. En Argentina la provisión de 150-200 mm por año por medio de riego por goteo parece adecuado para la principal cosecha de verano, mientras que es necesario suministrar 4-5 riegos por año para la cosecha por *scozzolatura* (Ochoa y Urhart, 2006a). Gugliuzza *et al.*, (2002 b) reportaron que con 2-3 riegos (60-100 mm) aplicados durante el periodo de desarrollo del fruto (FDP) aumentaron la productividad y la calidad del fruto, mientras que la aplicación de 2 riegos (50-80 mm) durante FDP son esenciales para obtener el tamaño de fruta para exportación en la cosecha por *scozzolatura* (Inglese *et al.*, 1995b). De acuerdo con Homrani Bakali (2013), la aplicación de 3-6 riegos por año producen más fruta que solamente un riego en Marruecos. En Sudáfrica Haulik (1988), sugiere ≤ 3 riegos suplementarios por año, comenzando en agosto, para estimular el flujo de flores, luego en antesis y nuevamente durante el desarrollo inicial del fruto. Cuando se practica la *scozzolatura*, el primer riego se da durante la inducción floral (40 días antes de emisión de yemas), el segundo después de floración y el último ≤ 5 semanas



después del amarre de fruto y durante la maduración del fruto (Targa *et al.*, 2013).

Los sistemas de riego por goteo y microaspersión son comunes en las huertas modernas de nopal tunero (Inglese, 1995). Los microaspersores cubren una área relativamente extensa con pequeños volúmenes, muy convenientes para nopal tunero con sus raíces superficiales y extensas (Potgieter, 2001; Snyman, 2004, 2005), influyendo positivamente en el tamaño y calidad de fruto (Inglese *et al.*, 2010). Aunque los métodos tradicionales de riego, tales como el riego en cajete, pueden ser menos eficientes, tales sistemas pueden proveer una solución rápida y barata a productores de pocos recursos si solamente se requieren de 2 a 3 riegos por temporada (Wessels, 1988b).

Los nopales son sensibles a las sales disueltas en la zona de raíces y por lo tanto la calidad del agua debe ser analizada, determinando previamente su aptitud para usarse en el riego. Según Nerd *et al.* (1991c), el NaCl disuelto en el agua del riego no debe de rebasar 25 mol m⁻³ para evitar problemas de salinidad. La captación de agua y el uso de coberteras son estrategias agrícolas efectivas que pueden mejorar la productividad del nopal en zonas áridas con escasez de agua. Mondragon Jacobo (1999) reporto el uso de pequeñas áreas de captación entre las hileras de plantas para coleccionar agua de lluvia y reducir la escorrentía, proveyendo de más humedad a la planta, lo que resulto en mayores rendimientos de fruta.

Raleo de fruta

El tamaño de fruta depende de la disponibilidad de agua (Barbera, 1984), de la variedad (Potgieter, 2007; Zegbe Domínguez y Mena Covarrubias, 2001b), la duración del periodo de desarrollo del fruto (Barbera *et al.*, 1992a), la nutrición mineral (Ochoa *et al.*, 2002) y de manera importante de la carga de frutos (Brutsch, 1992; Inglese *et al.*, 1995a). En contraste con muchos otros cultivos frutales, muy pocas flores se caen y aproximadamente el 95% de las flores se transforman en fruto, a menos que sean dañados por heladas invernales tardías. Sin embargo, si la carga de frutos no es reducida por el raleo, el tamaño individual del fruto es bajo, además de tener el riesgo del rompimiento de brazos debido al peso excesivo. Los precios de la fruta de los mercados locales y de exportación dependen del tamaño del fruto, y los frutos más grandes se venden a precios más altos. Sin embargo, un raleo fuerte dejando solo 4 frutos por cladodio puede reducir substancialmente el rendimiento - hasta 58% - sin incrementos notables del tamaño, y en ocasiones causar una segunda floración (Zegbe Domínguez y Mena Covarrubias, 2010a). De acuerdo con Brutsch (1992), los cladodios raleados producen frutos más grandes, sin importar el número de frutos por cladodio. De esta forma, se consigue un buen tamaño de fruta, a partir de un alto número de

frutos por cladodio seguido de un raleo oportuno que reduzca la carga de fruta.

Además de conseguir un mayor peso individual de fruto (Inglese *et al.*, 1995 a), el raleo de fruta tiene otras **ventajas:**

- facilita la cosecha (Wessels, 1989);
- previene el rompimiento de ramas debido a altas cargas de fruto (Wessels, 1989);
- reduce la alternancia de la producción (Wessels, 1988b; Hester y Cacho, 2003);
- se obtiene madurez más temprana y regular (Inglese *et al.*, 2002b);
- aumento de los sólidos solubles totales (TSS); y
- aumenta el porcentaje de frutos de primera clase (Zegbe Domínguez y Mena Covarrubias, 2009, 2010a, b).

El raleo de frutas puede realizarse tan pronto como las yemas florales tomen la forma esférica y que sean distinguibles de las yemas vegetativas las cuales presentan formas ovaladas (Wessels, 1988), pero no después de 3 semanas después de antesis; un raleo tardío no mejora el tamaño de fruto (Inglese *et al.*, 1995b; La Mantia *et al.*, 1988; Gugliuzza *et al.*, 2002a).

Las investigaciones han mostrado los frutos de tamaño exportación solo son obtenidos si se retienen no más de seis frutos por cladodio (Inglese *et al.*, 1994b). Dado que no todos los cladodios son del mismo tamaño, la norma en el comercio de Sudáfrica es ralear dejando 50-70mm entre frutos, más que un número predefinido de frutos por cladodio (Potgieter, 2001). Al dejar un espacio adecuado entre frutos se asegura menor daño de frutos adyacentes al momento de la cosecha, especialmente donde se usan tijeras especiales para esta operación. Los frutos que se desarrollan en las partes planas del cladodio deben de ser removidos ya que tienden a alargarse y desarrollar la parte baja del fruto "frutos con tallo", haciendo el empaque más difícil. Los frutos en exceso pueden ser removidos a mano usando guantes de hule y una navaja afilada o con tijeras de poda.

Cosecha fuera de temporada

La inducción floral en la mayoría de los cultivos frutales está muy bien sincronizada, reflejado en la cosecha en una fecha específica (Liguori y Inglese, 2015). Sin embargo una de las características importantes del nopal tunero es la capacidad de la planta para refloreecer en diferentes épocas en el mismo año (Inglese, 1995; Inglese *et al.*, 2002a), ya sea de manera natural o después de que hayan aplicado técnicas inductivas (Nerd y Mizrahi, 1997). Estas frutas obtenidas fuera temporada son vendidas a precios sustancialmente más altos que aquellos de las frutas normales de verano (Mondragón Jacobo *et al.*, 2009). La aplicación exitosa de técnicas de manipu-



lación de la cosecha tales como la *scozzolatura* y la producción invernal, han incrementado considerablemente la oferta de fruta de 5 a 9 meses al año en los mercados de fruta fresca de Sudáfrica, aunque el volumen es limitante de mayo a septiembre. Aun así el mercado de la tuna es general es muy estacional, con los cultivares disponibles se obtiene generalmente 4 meses por estación de cosecha (Inglese, 1995; Liguori y Inglese, 2015). El **incremento de oferta** de tuna en los mercados podría ser conseguido por medio de:

- el cultivo de nopal tunero en diversas zonas agroclimáticas (Mondragón Jacobo *et al.*, 2009; Liguori y Inglese, 2015);
- el uso de cultivares con diferentes periodos de madurez (Brutsch, 1992; Gallegos Vazquez *et al.*, 2006);
- el mejoramiento de la tecnología postcosecha (Liguori y Inglese, 2015); y
- la adopción de técnicas de manipulación del cultivo (Barbera *et al.*, 1992a; Brutsch y Scott, 1991).

Scozzolatura

La técnica de *scozzolatura* - que fue descubierta por azar a principios del siglo XVIII (Coppoler, 1827, citado por Barbera *et al.*, 1991, 1992a), se ha convertido en una práctica estándar en la producción de tuna en Italia (Barbera, 1995). La remoción completa de las flores en desarrollo y de los nuevos cladodios del flujo de verano, resulta en una segunda floración aproximadamente 12-16 días después con frutos que maduraran 6-8 semanas después que el flujo normal de primavera (Barbera *et al.*, 1988, 1991, 1992a; Brutsch y Scott, 1991). Aunque este flujo normalmente presenta menos flores que el primero, los frutos son vendidos a precios más altos (Brutsch y Scott, 1991; Barbera e Inglese, 1993; Boujghagh y Bouharroud, 2015), el cual hasta cierto punto compensa por la reducción en cantidad de frutos. La *scozzolatura* tiene las siguientes **ventajas**:

- Precios más altos;
- Mejor calidad de fruta - particularmente mayor tamaño de fruta, una proporción más alta de pulpa-semilla y un % de pulpa más alto (Barbera *et al.*, 1992b; Hammami *et al.*, 2015; Boujghagh y Bouharroud, 2015);
- Se incrementa la firmeza de la fruta y se obtiene una coloración más intensa de la fruta (Mondragón Jacobo *et al.*, 1995);
- La arquitectura de la planta se hace más compleja y compacta, debido a que se producen más cladodios fértiles en la parte terminal de la planta y se consigue un rendimiento más alto de fruta (cuando se practica en plantas jóvenes).

El índice de refluoración, definido como la proporción de flores obtenidas en el segundo flujo en relación al primer flujo (FII:FI), puede variar mucho dependiendo de la época en la cual se hace la remoción del flujo de flores

de verano o de las condiciones ambientales al momento de la remoción (Inglese, 1995). El número de cladodios producidos por la *scozzolatura* puede variar del 10-40% del flujo de primavera y el rendimiento de fruto puede ser hasta 50% más bajo que el obtenido en la cosecha de verano (Nerd *et al.*, 1991b; Inglese, 1995). De hecho la *scozzolatura* puede también tener algunas **desventajas** que incluyen:

- reducción de rendimiento;
- mayor porcentaje de pulpa (Mondragón Jacobo *et al.*, 1995) - posiblemente debido a la reducción de la temperatura durante el periodo de llenado de fruta- (Inglese, 1995; Hammami *et al.*, 2015);
- menor contenido de azúcares solubles;
- incremento del agrietamiento de la cascara;
- reducción de los ácidos titulables;
- pobre coloración de fruta (Inglese, 1995; Mulas, 1997).

Un máximo de 25% de los cladodios producidos en verano deben ser mantenidos en la planta después de la *scozzolatura*, debido a que un % mayor reduce la tasa de refluoración para la siguiente primavera y puede inducir alternancia de la producción (Inglese *et al.*, 2002b, 1994a). Las condiciones climáticas, la respuesta de la variedad y la época de remoción del primer flujo de floración son factores importantes que afectan la *scozzolatura*.

Las condiciones de clima al momento de la eliminación de influye el grado de refluoración y pueden causar grandes variaciones anuales en la respuesta a refluoración (Barbera *et al.*, 1991; Nieddu y Spano, 1992). Por ejemplo, cuando la iniciación de yemas coincide con periodos de alta temperatura se obtienen bajas tasas de refluoración, resultando en más yemas vegetativas que reproductivas (Nerd, *et al.*, 1989; Nobel y Castañeda, 1998). En algunos países la *scozzolatura* es realizada con riego (Inglese *et al.*, 2002a) y fertilización nitrogenada (Flores Valdez, 2003), o los agricultores pueden aplicar una fertirrigación por única vez al momento de remoción de flores (Nerd *et al.*, 1993b). Es esencial la selección del cultivar más adecuado para esta técnica, porque la refluoración puede ser baja o aun ausente en algunas variedades (Mondragón Jacobo, 2001; Targa *et al.*, 2013). El momento de la eliminación del primer flujo de flores (EPFF) afecta la extensión de la refluoración, el tiempo a la madurez y las características el fruto (Barbera *et al.*, 1992b). Inglese (1995) reporto tasas de refluoración entre 0.7 para EPFF realizada en pre-antesis y de 0.5-0.3 la EPFF para post-antesis. La remoción antes de la floración produce la más alta tasa de refluoración (Brutsch y Scott, 1991), pero la remoción tardía se asocia con mejores precios de la fruta, aunque el rendimiento puede ser más bajo comparado con las otras EPFF (Mulas, 1992; Boujghagh y Bouharroud, 2015). Además de practicarse en Italia, la *scozzolatura* es una práctica regular en huertas de Sudáfrica (Brutsch y Scott, 1991), Marruecos



(Boujghagh y Bouharroud, 2015) y Tunes (Aounallah et al., 2005; Hammami et al., 2015). En otras partes del mundo la *scozzolatura* no ha dado buenos resultados. Por ejemplo, la *scozzolatura* bajo las condiciones de la región central de México, con las variedades Cristalina y Reyna dieron resultados negativos (Mondragon Jacobo et al., 1995), de manera similar, Ochoa et al., (2009) reportaron muy bajas tasas de refluoración (0.05) en Argentina con la variedad "Amarilla sin espinas".

Después de la *scozzolatura* realizada con el primer flujo de flores, el proceso puede ser repetido con la remoción completa de la flores y cladodios inducidos por la primera *scozzolatura* (Inglese et al., 2010). Liguori et al., (2006) demostraron que la remoción doble de los nuevos frutos y cladodios indujo un tercer flujo de estos órganos a finales de Agosto, cuyos frutos maduraron en invierno (Junio-Marzo) en el hemisferio norte. Los frutos de invierno fueron obtenidos con doble *scozzolatura* y cubierta de polímero plástico PVC colocado a finales del otoño, presentando tamaño y porcentaje de pulpa regular, pero con una ligera disminución de los azúcares totales. Sin embargo, la tasa de refluoración de este segundo flujo fue muy baja (20-40%) (Liguori e Inglese, 2015). Las bajas temperaturas decembrinas detuvieron el crecimiento y maduración del fruto; para lograr el desarrollo normal hubo necesidad de cubrir las plantas con túneles de plástico (Liguori et al., 2006).

Producción invernal de tuna

La floración del nopal no está restringida a la primavera. Pequeños flujos naturales de floración se han registrado en Argentina (Inglese, 1995), California (Curtis, 1977) y Chile (Sudzuki Hills et al., 1993), así como en las áreas subtropicales calientes de Limpopo, Sudafrica (Groenewald, 1996; Potgieter, 2001). Además de la brotación natural fuera de temporada en áreas con inviernos moderados, es factible obtener una segunda floración: Nerd et al., (1993b) y Nerd y Mizrahi (1994) mostraron que después de la cosecha principal de verano, un riego inmediato y aplicación de N a dosis de 120 kg ha⁻¹ produjo una brotación en otoño; la producción de flores incremento cuando se aumentó la dosis de N y estuvo altamente correlacionada con el contenido de N reducido soluble de los cladodios terminales (Nerd y Mizrahi, 1994).

Aunque la cosecha invernal produce rendimientos 50-80% menores que la cosecha principal de verano (Nerd et al., 1993b), se obtienen precios más altos (Mondragon Jacobo y Bordelon, 1996). Groenewald (1996) reporto que aun sin irrigación, esta técnica podría ser aplicada con éxito bajo condiciones de temporal en regiones que reciben lluvias de verano en Sudáfrica.

Asimismo, la respuesta de la floración a la aplicación de N puede ser afectada por la edad de las plantas. La

inducción de yemas florales es más alta en plantas jóvenes (≤ 6 años) que en plantas viejas (Nerd y Mizrahi, 1994). Sin embargo, esta técnica es factible únicamente en zonas donde las temperaturas invernales son suficientemente altas para el desarrollo del fruto (Nerd et al., 1993b). La proporción cascara-fruto es más alta en el invierno que en el verano, debido a un mayor grosor de cascara (Nerd et al., 1993; Groenewald, 1996). Los productores deben considerar que las variedades que producen altos rendimiento en verano (e.g. "American Giant") no responden al N aplicado. Asimismo, la poda debe de ser diferida hasta después que la fruta de invierno madure, para entonces las yemas florales de la cosecha principal de verano estarán ya presentes, haciendo la poda más difícil (Groenewald, 1996).

Sanidad de la huerta

Los cladodios de invierno podados y las ramas que se quiebran durante las operaciones normales del huerto y las frutillas removidas durante el raleo deben de ser removidas periódicamente del huerto y destruidas. Los residuos de poda no deben ser depositados cerca del huerto, porque pueden continuar creciendo y servir como hospederos de cochinilla, *Cactoblastis* o inoculos de patógenos, lo que resulta en un incremento de los costos de protección fitosanitaria (Potgieter, 2001).

Productividad

El rendimiento de tuna es extremadamente errático y la producción varía significativamente no únicamente entre y dentro de países, sino entre huertas de la misma variedad. El rendimiento de fruta varia de 1-5 ton ha⁻¹ usando métodos de cultivo tradicionales a 15-30 ton ha⁻¹ usando métodos intensivos de cultivo en condiciones de temporal (400-600 mm de lluvia por año (Monjauze y Le Hœuou, 1965a). El rendimiento de tuna es relativamente bajo en huertas de México (2-8 ton ha⁻¹ (Pimienta Barrios, 1990, 1994), sin embargo, algunas huertas irrigadas pueden producir hasta 25 ton ha⁻¹ (Gallegos Vázquez et al., 2009). En Chile, los rendimientos de tuna son generalmente bajos (6-9 ton ha⁻¹, Sáenz, 1985), mientras que en Argentina varían de 8-11 ton ha⁻¹ en huertas e temporal (Ochoa, 2003) a 22 ton ha⁻¹ en sitios con riego (Ochoa, 2003). Se han registrado rendimientos totales de tuna de hasta 50 ton ha⁻¹ en el Karoo, Sudáfrica (Brutsch, 1979) y Texas, EUA (Parish y Felker, 1997). En otras áreas de temporal de Sudáfrica, tales como la provincia de Free State, el rendimiento promedio más alto obtenido fue de 17.44 ton ha⁻¹ en un ensayo comparativo de 42 variedades (Coetzer y Fouche, 2015). En Israel e Italia, se obtienen regularmente rendimientos de 20-30 ton ha⁻¹ (Barbera e Inglese, 1993; Nerd et al., 1993b).

Si las huertas de nopal son bien manejadas podrían tener una vida productiva de >100 años, como se puede



observar en Sudáfrica (Le Houeroù, 1994). El rendimiento de fruta se espera que incremente desde la plantación hasta el 5º año de producción cuando las plantas alcanzan la madurez plena (Potgieter, 2007). La mayoría de las flores se desarrollan en cladodios terminales de 1 año de edad, mientras que los nuevos cladodios usualmente emergen en cladodios de 2 o más años de edad (Inglese *et al.*, 2002; Wessels 1988a). La fertilidad de los cladodios depende de las condiciones ambientales, edad de la planta y la acumulación de materia seca (MS) (García de Cortázar y Nobel, 1990; Inglese *et al.*, 2002; Valdez Cepeda *et al.*, 2013). Los cladodios con acumulación de MS más alta que el promedio tienden a producir más frutos (García de Cortázar y Nobel, 1992).

Las posibles razones de la alta variabilidad del rendimiento de fruto pueden estar en cuatro áreas principales; condiciones ambientales, genotipo y sus interacciones, planeación y diseño del huerto, y prácticas de manejo (Nerd *et al.*, 1991b; Inglese, 1995; Inglese *et al.*, 2002a; Potgieter 2007).

Condiciones ambientales

En contraste con el crecimiento vegetativo, se conoce poco de la influencia de los factores ambientales sobre la fertilidad de los cladodios y el rendimiento del nopal tunero (Inglese *et al.*, 1995a; Nerd y Mizrahi, 1995b). Según Barbera *et al.*, 1991; García de Cortázar y Nobel (1991) y Nerd y Mizrahi, (1995b) e Inglese *et al.*, (2002a), la fertilidad de los cladodios depende de las condiciones ambientales tales como: estado hídrico de la planta, temperatura, densidad flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) y nutrientes del suelo. Wessels (1989) relaciono la variación estacional del rendimiento de tuna con:

- diferencias en condiciones agroclimáticas (requerimientos de frío, lluvia y temperatura);
- diferencias en fertilidad del suelo: y
- pobre polinización y fertilización debido a la ausencia de polinizadores y condiciones climáticas inadecuadas durante el periodo de polinización (frío, lluvia).

Potgieter en (2007) demostró que los niveles de P y N del suelo tuvieron el efecto más grande sobre el rendimiento de fruta de 11 variedades de tuna. Es también bien conocido que se puede obtener más de una cosecha en el mismo ambiente por medio de la refluoración natural o inducida (Barbera *et al.*, 1991; Brutsch and Scott, 1991; Nerd *et al.*, 1993b; Sudzuki Hills *et al.*, 1993).

Características de la variedad e interacciones

Brutsch (1979) y Pimienta Barrios (1990, 1994) y Wessels (1988a, 1989) indicaron que las variedades difieren en su vigor reproductivo y fertilidad de cladodios. De acuerdo con Wessels, 1989 y Pimienta Barrios, (1990) la **amplia variación de productividad entre variedades** es debida a:

- Diferencia de fertilidad genética inherentes;
- Fertilidad de la planta madre; y
- Fertilidad del cladodio de la planta madre.

Por otro lado, la variación dentro de cultivares es debida a:

- Variación en fertilidad de la planta madre; y
- Diferencias de fertilidad entre cladodios de acuerdo a su posición en la planta madre.

Según Barbera (1995) las grandes diferencias en rendimiento de fruta se deben al entendimiento inadecuado de la **interacción planta x ambiente**. En un experimento de 8 años de duración con 11 variedades de nopal tunero en tres diversas zonas agroclimáticas de Sudáfrica (Potgieter, 2007), mostro que existen diferencias significativas entre variedades, diversos ambientes y años de producción en términos de rendimiento de fruto y sus componentes. La varianza observada en el rendimiento de fruto fue debida primero al nivel de P en el suelo y después al N aplicado. Los resultados mostraron claramente que los factores ambientales tienen una influencia definitiva sobre el rendimiento de fruto, sino que además existe una fuerte interacción entre las 11 variedades y las condiciones ambientales. Solamente un cultivar mostro amplia adaptación y la capacidad de producir es un carácter genético más que una interacción GxE (Potgieter, 2007).

Planeación y diseño de la huerta

La productividad de fruta del nopal puede ser mejorada incrementando el número de cladodios fértiles por planta y/o aumentando la densidad de población (Inglese *et al.*, 2002a). Se han reportado rendimientos sorprendentemente altos de tuna con densidades de plantación muy altas. En Israel, usando 1.5m entre plantas y 4m entre hileras (1666 plantas ha⁻¹) se aumenta substancialmente el número de cladodios fértiles en las primeras etapas de la vida de la huerta, obteniendo rendimientos de 18 ton ha⁻¹ durante 4 años reportados (Nerd y Mizrahi, 1993). Según Inglese *et al.*, (2002a), para obtener un rendimiento anual de 20 ton ha⁻¹, se necesitan 28-30,000 cladodios fértiles, un peso promedio de fruto de 100-120g y fertilidad de cladodio de seis frutos por cladodio después del raleo. Esto implica que cada planta tenga 80 a 90 cladodios fértiles por planta, a un espaciamiento de 6 x 5 m (355 plantas ha⁻¹) o 28-30 cladodios fértiles por planta en una plantación formada como seto, con plantas espaciadas a 5 x 2m (1000 planta ha⁻¹) (Inglese *et al.*, 2002a). Un incremento adicional del rendimiento implicaría incrementar el número de cladodios fértiles más que incrementar la fertilidad de los cladodios (Inglese, 1995).

Manejo de huerto

Aun en huertos bien manejados de la misma variedad se observan regularmente grandes variaciones del rendimiento (Potgieter, 2007). Los rendimientos bajos re-



portados en huertas de nopal tunero de México son atribuidos parcialmente al hecho de que un gran porcentaje de los productores no usa prácticas culturales como la fertilización y la poda, lo cual resulta en un pobre crecimiento vegetativo y bajos rendimientos de fruta (Pimienta Barrios, 1994). En comparación, en Sicilia se obtienen rendimientos relativamente altos (14 ton ha⁻¹) principalmente debido a la aplicación de riego, fertilizantes y raleo (Tudisca *et al.*, 2015).

La producción alternada o bianual es común en el nopal tunero (Brutsch, 1979; Pimienta Barrios, 1990), y es una de las razones de las grandes diferencias en los rendimientos anuales de la tuna. Inglese *et al.*, (1995) y Brustch (1979) señalaron que las posibles razones de la alternancia de la producción son:

- poda incorrecta
- diferencias varietales;
- edad de la planta:
- competencia entre crecimiento vegetativo y floral;
- Y
- época de inducción de brotación.

Aun así, los productores prefieren una variedad que produzca consistentemente - aun cuando el rendimiento sea bajo - más que una variedad que produzca bien un año y al siguiente tenga una cosecha pobre, porque este comportamiento tiene efectos económicos negativos en el flujo de efectivo de la empresa (Poitgieter y Smith., 2006; Potgieter, 2007). De hecho, la competencia entre crecimiento vegetativo y reproductivo, así como la reducción en el número de cladodios nuevos después de la remoción del flujo de flores de verano, son factores potenciales de inducción de alternancia de la producción (Inglese *et al.*, 2002b). Aunque Barbera *et al.*, (1991) encontró que las plantas alternantes en el año malo tenían el mismo número de cladodios de 1 año que el número presente en el año bueno, la mayoría de estos cladodios fueron infértiles bajo *scozzolatura*. Los enfoques prácticos para **reducir la alternancia de la producción** son:

- adoptar sistemas apropiados de poda (García de Cortázar y Nobel, 1992):
- asegurar el raleo de frutas (Wessels, 1989; Hester y Cacho, 2003; y
- evitar la *scozzolatura* y la producción invernal en el mismo huerto cada año.

COSECHA

La calidad es un factor muy importante en la producción de fruta, dado que los consumidores prefieren fruta atractiva con buen sabor y buena calidad nutricional. La calidad en general es más alta al momento de la cosecha y va declinando conforme a la variedad, a los

tratamientos precosecha, a los efectos ambientales, al grado de madurez de la fruta en la cosecha, el proceso y manejo, los tratamientos postcosecha y las condiciones de almacenamiento y distribución. La calidad en general incluye un complejo grupo de características que no siempre están correlacionadas positivamente: dependiendo del grupo específico de consumidores, el mercado destino y el tiempo de almacenamiento estimado, la importancia de estos elementos cualitativos varían. Conforme los frutos maduran su valor nutricional y el sabor mejora, pero las defensas naturales contra patógenos y la susceptibilidad a desordenes fisiológicos y su vida de anaquel decrecen. Por lo tanto la tuna como en cualquier otra fruta (Crisosto y Valero, 2008) para entrega directa a los mercados locales, la cosecha debe ser realizada cuando se tenga la más alta calidad comestible; aunque para el transporte a mercados distantes la cosecha temprana es más apropiada para prologar la vida postcosecha.

Para identificar la mejor etapa de cosecha de la tuna, existen o se han desarrollado índices objetivos y subjetivos de madurez, basados en factores tales como: variedades, país productor, destino de la fruta y utilización. Los índices de madurez más conocidos incluyen:

- porcentaje de cambio de color de la cascara o epidermis:
- el contenido de sólidos solubles totales: \geq a 13%
- la firmeza de la pulpa (medido con un penetrómetro con una punta de 8 mm); \geq 8 kg cm⁻² (Pimienta Barrios, 1990; Barrera *et al.*, 1992);
- el nivel de azúcar reductores alrededor del 90% con la fruta totalmente madura, sin embargo en algunas variedades los azúcares reductores nunca exceden de 50% del total de los azúcares totales (Pimienta Barrios y Mauricio, 1989).
- la abscisión de las gloquidas o ahuates;
- llenado de la cavidad floral del receptáculo;
- % de pulpa;
- el grosor de la cascara y facilidad de remoción; y
- al final la resistencia de la cascara al manejo físico (Cantwell, 1995).

Las tunas son particularmente difíciles de cosechar debido a la presencia de gloquidas y espinas las cuales atraviesan la piel y pueden alojarse en los ojos y en el tracto respiratorio. Así la fruta debe ser cosechada en la mañana cuando la humedad es suficientemente alta para evitar que las gloquidas se desprendan y floten en el aire. Los cosechadores deben ser provistos con ropa de protección (guantes y lentes de seguridad). A pesar de que la planta se ve fuerte en apariencia y su habilidad para tolerar condiciones ambientales duras, la fruta es muy sensible y no puede tolerar manejo rudo (Wessels, 1992a).

Para la mayoría de los cultivares, la liberación fisiológica de la articulación que conecta la fruta con el cladodio



madre no es débil y es fácil lastimar al momento de la cosecha, en ocasiones el daño esta parte es inevitable si el fruto es cosechado arrancándolo, jalándolo o torciéndolo. Por lo tanto, para propósitos comerciales se debe usar un cuchillo bien afilado, realizando un corte limpio en la base de la fruta y dejando una pequeña fracción de cladodio pegado a la fruta. Los cosechadores usualmente colectan la fruta en canastas o cubetas de plástico y los vacían en cajas de plástico que pueden contener de 15 a 20 kg de fruta para trasportarlos al empaque.

El daño físico durante la cosecha y el transporte pueden comprometer marcadamente la calidad de la fruta y su duración en almacenamiento, e incrementar la susceptibilidad de la fruta a daños fisiológicos y al deterioro general. Las heridas o raspaduras que pueden ocurrir por la presión de los dedos en el momento del corte del fruto o el impacto cuando la fruta es dejada caer en los cestos de cosecha, así como durante el transporte y manejo en el empaque, causa heridas que pueden transformarse en cortes y también por las gloquidas. La susceptibilidad de la fruta a daño físico incrementa por el grado de madurez. La presión celular alta también puede causar grietas y microgrietas en la cascara, especialmente en la fruta de la segunda cosecha la cual madura en condiciones ambientales más húmedas.

Manejo postcosecha

La presencia de espinas y gloquidas es uno de los principales limitantes para el consumo de tunas y para el mercado; a nivel mundial el desespinado es la operación postcosecha obligada antes de comercializarse. En muchos países, especialmente a que los que destinan la fruta para mercado local y que es consumida dentro de unos pocos días después de la cosecha, el desespinado se hace todavía manualmente; la fruta se esparce en un área con pasto cubierta con paja y es cepillada con escobas (Cantwell, 1995). Sin embargo cuando la fruta es destinada a mercados distantes el desespinado se realiza con maquina desespinaadora en la empacadora.

A diferencia de otras clases de frutas las operaciones postcosecha de la tuna son bastante simples y restringidas al desespinado, clasificación de tamaño y el empaque. Independientemente de la escala de la empacadora, el desespinado es generalmente realizado por cepillado en seco. Dado que no existen tratamientos postcosecha, la producción de varios productores puede ser consolidada y manejada en una **empacadora a pequeña escala** con una lineada de empaque pequeña y simple que tenga los siguientes componentes:

- Una estación de recibo - en el cual la fruta es vaciada antes de pasar a una serie de rodillos;
- Un túnel, que contiene una serie de cepillos cada uno rotando en dirección opuesta al adyacente, que remueven las gloquidas, estas son extraídas por vacío

fuera de la unidad y depositadas en bolsas desechables o en ocasiones se dejan por debajo de los rodillos y de ahí se colectan;

- Un segundo juego de rodillos, en el cual la fruta es conducida hacia una mesa redonda rotatoria donde los trabajadores la seleccionan, clasifican y empaican.

Las **empacadoras de mayor tamaño** comprenden lo siguiente:

- área de recibo;
- banda conductora donde los trabajadores preseleccionan la fruta;
- estación de desespinado - diseñado con los mismos criterios que se describieron para la empacadora a pequeña escala;
- estación de clasificación por tamaño, la cual puede ser mecánica o electrónica;
- estación de recibo y de empaque para una clasificación final y empacada.

Las frutas son generalmente empacadas el mismo día de la cosecha y se entregan directamente a los mercados destino en condiciones de refrigeración. Pueden ser transportados solas o en combinación con otros productos, por camión, barco o por avión. Cuando la fruta es manejada unos cuantos días después de la cosecha se puede almacenar condiciones ambientales para curarla o en cuartos de almacenamiento que estén a una temperatura entre 6 y 10°C. En algunos cuantos países (por ejemplo Sudáfrica) la fruta es encerada para remplazar las ceras naturales que se perdieron en el desespinado, para reducir la transpiración y mejorar el brillo de la cascara. No hay fungicidas sintéticos registrados para aplicación postcosecha; por lo tanto se debe evitar heridas para prevenir deterioro microbiológico.

En Italia la selección de frutos está basada en:

- el cultivar o variedad ('Giallá' o 'Surfarina'; 'Red' o 'Sanguigna'; y 'Bianca' o 'Muscaredda' o 'Sciannarina');
- categoría (EXTRA y 1ª); y
- peso (clase B, 105-140 g; clase C, 140-190 g; clase D, 190-270 g).

Dependiendo de la variedad, el color de la cascara puede cambiar de verde a naranja-amarillo para los cultivares amarillos ("Giallá"). De verde a rojo rubí para los cultivares de tuna roja ("Rossa") y de verde a verde blanquecino para los cultivares de color blanco ("Bianca"). Dependiendo del área de producción, la fruta destinada al mercado fresco debe de tener las siguientes características:

- peso ≥ 120 g
- total de sólidos solubles $\geq 13-14^\circ$ Brix
- firmeza del fruto 6 kg cm^2

Las frutas más grandes pueden ser empacadas en cajas plásticas con charolas de una sola capa que se insertan



en charolas de plástico o cartón directamente en cajas de cartón. La fruta pequeña, generalmente es destinada al mercado local, empaçada en charolas de plástico o insertos conteniendo 6-8 frutas.

Fisiología postcosecha

Las tunas están clasificadas como frutas no climatéricas, ya que no exhiben un incremento en la actividad respiratoria durante el proceso de maduración. Las tasas de respiración son consideradas bastante bajas comparadas con otras frutas (Lakshminarayana y Estrella, 1978; Cantwell, 1995). Sin embargo la intensidad de respiración es fuertemente afectada por:

- variedad de tuna, numerosas y diferentes;
- etapa de madurez al momento de la cosecha
- tipo de cultivo y,
- condiciones ambientales.

En un estudio de diferentes variedades mexicanas conducido por Lopez Castañeda et al en (2010), reporto que la actividad respiratoria vario de 22 en "Roja Pelona" a 31 ml de CO₂ kg hora⁻¹ en la variedad "Sangre de Toro" y "Alfajayucan". En estudios conducidos en Italia con fruta de la primera cosecha de tuna "Gialla", la intensidad de respiración mostro una marcada variabilidad de año a año, variando de 4 a 14 mg CO₂ kg⁻¹ hora (Chessa y Schirra, 1992), a 13 mg CO₂ kg⁻¹ hora⁻¹ (D'Aquino et al., 2014) y 60-92 mg CO₂ kg⁻¹ hora⁻¹ (Piga et al., 1996). Al igual que en otras especies no climatéricas, la respiración declina gradualmente cuando la fruta es mantenida a temperaturas altas (D'Aquino et al., 2014) pero cuando es movida de la refrigeración a temperatura ambiente la respiración incrementa notablemente (Schirra et al., 1999b), otras condiciones que incrementan rápidamente la actividad respiratoria son; daño por frio, infección por microorganismos, estrés físico o mecánico causado por raspaduras, impactos o heridas. La producción de etileno es muy baja, generalmente de 0.1-0.2 µL de C₂H₄ hora⁻¹ de la respiración, pueden ocurrir incrementos significativos después de la exposición prolongada a temperaturas muy frías, o debido a la infección por patógenos o estrés abiótico (D'Aquino et al., 2014; Schirra et al., 1996, 1997).

Similar a la mayoría de los frutos no climatéricos, la tuna no contiene almidón. Por lo tanto después de la cosecha, los azúcares solubles totales (TSS), azúcares y los ácidos orgánicos tienden a disminuir, dependiendo de las condiciones de almacenamiento, la etapa de madurez y la variedad, la disminución puede ser gradual o irregular. Por ejemplo en un estudio comparativo de seis cultivares de tuna almacenada a 9°C durante 1, 2 y 3 meses más cuatro días a temperatura ambiente, la pérdida de TSS fue muy alta en "Amarilla Montesa", "Copena T5" y "Copena-Torroja", pero gradual en "Cristalina" y "Picochulo", mientras que en "Burróna" las pérdidas fueron muy altas

durante el primer mes de almacenamiento (Corrales García et al., 1997).

El contenido de vitamina C al momento de la cosecha varia de 10 a 80 mg 100 g⁻¹ dependiendo del cultivar (Butera et al., 2002; Kuti, 2004). Este puede variar notablemente de año en año (Sumaya Martínez et al., 2011), pero también depende de la etapa de madurez. En cultivares de frutos color amarillo y naranja de *Opuntia megacantha* cosechados a intervalos de dos semanas, 4 semanas antes de la madurez comercial, y 4 semanas después de la madurez comercial, el contenido de vitamina C aumento constantemente aun cuando la fruta estuviera sobremadura (Coria Cayupan et al., 2011). En tunas almacenadas a baja temperatura, el contenido de vitamina C es estable a pesar de que el pH del jugo es relativamente alto (Schirra et al., 1996), pero declina rápidamente a temperatura ambiente (D'Aquino et al., 2014) o después de que la fruta se traslada del almacenamiento en frio a temperaturas calientes (Schirra et al., 1996).

Desordenes fisiológicos

Similar a otras especies de origen tropical, la tuna es susceptible a daños por frio cuando se expone por periodos prolongados a temperaturas debajo de 10-12°C. De hecho la sensibilidad intrínseca de la tuna a baja temperatura es afectada marcadamente por:

- condiciones ambientales;
- practicas agronómicas;
- tipo de cultivo (de verano o tardío), etapa de madurez a la cosecha y
- tratamientos postcosecha.

Generalmente la fruta en estado de avanzado estado de madurez es menos susceptible a daños por frio que la menos madura, mientras que el tratamiento precosecha con ácido giberélico (Schirra et al., 1999a) o cloruro de calcio (Schirra et al., 1999b) no afecta o incrementa la susceptibilidad al daño por frio. Los síntomas de daño por frio se pueden manifestar en la cascara como áreas escaldadas o bronceadas que varían en tamaño e intensidad, como manchas hundidas negro - café a hoyos de color café (D'Aquino et al., 2012). Sin embargo el daño por frio puede también causar alteraciones metabólicas además de los síntomas visibles; de la misma forma, la apariencia y la severidad de los desórdenes de la cascara son acompañados de alteraciones cualitativas no visibles. De hecho las alteraciones de la cascara son usualmente la expresión de una serie de desórdenes inducidos por las bajas temperaturas y otras causas (heridas superficiales infligidas por las gloquidas, transpiración excesiva, raíces secas, etc.) que pueden aparecer a temperaturas normales (D'Aquino et al., 2012). Los desbalances metabólicos pueden alterar el metabolismo respiratorio, inducir la producción de volátiles indeseables (acetaldehído, etanol) y etileno, y reducir los



mecanismos de defensa contra patógenos (Schirra et al., 1999 a; D'Aquino et al., 2014). Como resultado, la fruta dañada por frío puede mostrar desordenes de la cascara sin provocar cambios en la calidad de consumo o composición química (D'Aquino et al., 2014) o pueden mostrar síntomas negligibles de daño por frío al final de la etapa de refrigeración, pero ser altamente susceptibles al deterioro cuando se muevan a temperaturas más calientes (Schirra et al. 1996, 1997, 1999b; D'Aquino et al., 2014).

Deterioro post-cosecha

La composición de la fruta y la consistencia de sus tejidos hacen que la tuna sea altamente susceptible al deterioro incitado por varios hongos patógenos, levaduras y bacterias. La base de la fruta es el principal sitio de infección debido a la herida causada por las operaciones de cosecha. Sin embargo, el tratamiento de curado por uno o dos días a temperatura ambiente con buena ventilación ayuda a la cicatrización del tejido herido. Aun una leve deshidratación de la pequeña fracción de cladodio dejada durante la cosecha puede efectivamente reducir el riesgo de deterioro (Cantwell, 1995; Inglese et al., 2002 a). Otros sitios de infección pueden ser las heridas causadas por los ahuates y las microgrietas de la cascara, especialmente si la fruta de la cosecha tardía es colectada en condiciones húmedas. Los principales hongos filamentosos responsables del deterioro son *Botrytis cinérea*, *Fusarium* spp., *Aspergillus* spp., y varias especies de *Penicillium*, incluyendo *P. digitatum*, *P. italicum*, *P. expansum* y *P. polonicum* (Chessa y Barbera; 1984; Rodríguez Felix et al., 1992; Granata y Sidoti, 2000; Swart et al., 2003; D'Aquino et al., 2015); Faedda et al., 2015 a). Sin embargo, dado que la fruta generalmente no es almacenada por largo plazo, el riesgo de pudriciones no representa problema serio.

Tratamientos post-cosecha

A pesar de los pocos tratamientos usados a nivel comercial, excepto por la refrigeración ocasional por periodos cortos, se registra un incremento en la demanda mundial de tuna - especialmente de mercados ubicados lejos de las zonas productoras -, lo que impondrá nuevos retos a la industria del nopal tunero en el futuro. Para extender la ventana de oportunidad más allá de la época de cosecha y retrasar el deterioro de la apariencia, se requieren tratamientos **postcosecha y de procedimientos de manejo** para:

- reducir las tasas de respiración y transpiración;
- incrementar la tolerancia de la fruta a temperaturas bajas; y
- prevenir el deterioro microbiológico.

Mientras que la refrigeración es sin duda el medio principal para prolongar la vida postcosecha de la fruta y hortalizas frescas, la susceptibilidad de la tuna al daño por frío impone límites a su uso. Por otro lado al igual

que otros productos, conforme se incrementa la vida de almacén, los mecanismos naturales de defensa de los tejidos contra patógenos declinan y la fruta se vuelve progresivamente más susceptible a los ataques microbiológicos, especialmente cuando se mueve del cuarto frío al ambiente caliente.

Los experimentos conducidos con fungicidas aprobados para uso en post-cosecha para otros productos vegetales revelaron varios grados de efectividad en la reducción del deterioro en tunas almacenadas en refrigeración:

- los tratamientos con Benomilo, Captan y Vinclozolin no fueron efectivos en el control de deterioro postcosecha (Gorini et al., 1993).
- Los tratamientos con Imazalil (IMZ) y thiabendazol (TBZ) previnieron el deterioro natural causado por *Penicillium* spp., *Botrytis cinérea* y *Alternaria* spp., de la primera cosecha en la variedad "Gialla" durante un periodo de refrigeración de más de 2 meses a 8°C seguido de una semana de un periodo simulado de condiciones de mercado a 20°C, los síntomas de daño por frío también se redujeron (D'Aquino et al., 1996). El ortofenilfenato solo o en combinación con TBZ o IMZ fue fitotóxico, y resulto en un incremento en el deterioro y pérdida de peso (D'Aquino et al., 1996). La eficiencia del TBZ se incrementó de forma marcada cuando se aplicó a 52°C, aun a una concentración seis veces menor que la aplicada a 20°C (Schirra et al., 2002).
- Fludioxonil es un fungicida registrado en la pasada década para controlar un amplio rango de hongos causantes de deterioro de diferentes productos agrícolas, el cual mostro control muy eficiente cuando se aplicó a 20 o 50°C antes del almacenamiento, por otro lado, su efectividad se redujo cuando fue aplicado al término del periodo de almacenamiento en frío (D'Aquino et al., 2015).
- El agua caliente, a 50-55°C ya sea por inmersión por 2-5 minutos (Schirra et al., 1996; 2002; Rodríguez et al., 2005; D'Aquino 2012) o aplicada como cepillado a 60, 65 o 70°C durante 30, 20 o 10 segundos, respectivamente inhibió el crecimiento de patógenos presentes de manera natural en la superficie de la fruta (Dimitris et al., 2005).
- El curado (en ambiente saturado de vapor a 38°C durante 24, 48, y 72 horas) no solamente controlo el deterioro sino también mejoro la sensibilidad de la fruta a temperaturas frías (Schirra et al., 1997). Pero el curado de la tuna a 38°C con 75-80% de humedad relativa (HR) acelero la separación de la fracción del cladodio madre que se deja durante la cosecha. Además, la cicatrización de la cicatriz de la base de la tuna con respecto a la fruta curada a la misma temperatura pero a 100% RH, redujo el deterioro causado por patógenos que provienen del tallo (D'Aquino et al., 2014). El acondicionamiento a temperatura alta retraso el envejeci-



miento y la pérdida de peso, debido posiblemente al reacondo de la capa de cera epicuticular que rellena las microgrietas que separan las plaquetas, la principal vía de salida de transpiración de la fruta (Schirra *et al.*, 1999a; López Castañeda *et al.*, 2010).

Otros tratamientos que pueden retrasar la pérdida de frescura e incrementar la tolerancia a las bajas temperaturas son: almacenamiento en atmósferas controladas (Testone y Eccher Zerbini, 1990; calentamiento intermitente (Chessa y Schirra, 1992), tratamiento de inmersión en una solución de ácido salicílico (Al Qurashi y Awad, 2012) y envoltura en películas (Piga *et al.*, 1996, 1997; Shumye *et al.*, 2014), aunque esta última incrementa la presencia de volátiles indeseables (Piga *et al.*, 1996) si la permeabilidad de la película a los gases no es igual a los requerimientos de O_2 de la película empacada.

TUNA PELADA LISTA PARA EL CONSUMO

En las últimas dos décadas el mercado de las frutas precortadas (FP) y listas para el consumo ha experimentado un crecimiento sostenido, debido a la tendencia de los consumidores por obtener comida saludable y conveniente en cualquier lugar y momento. Las frutas y hortalizas listas para consumo son atractivas al consumidor porque no requieren de esfuerzo y porque no generan los desechos comunes del pelado y descorazonado (Roja Grau *et al.*, 2011). Esto es particularmente relevante en el caso de la tuna, donde la presencia de gloquidas hace que la fruta sea difícil de pelar, especialmente para las personas que no la conocen.

Las frutas y hortalizas precortadas son productos muy perecederos, las heridas causadas por las operaciones de proceso estimulan la respiración y la tasa de producción de etileno, acelerando la pérdida de sustratos de la respiración, la senescencia y reduciendo la firmeza. Los tejidos dañados también están expuestos a oscurecimiento oxidativo debido a la actividad de la enzima polifenol oxidasa (PFO) (Beaulieu y Gorny, 2004). El incremento en la demanda de frutas precortadas ha tenido un marcado impacto en las compañías implicadas en el proceso y la distribución; ya que se pone mayor atención a los requerimientos higiénicos y las nuevas soluciones de empaque que son adoptados para cumplir con los requerimientos de la logística y del consumidor (Timpanaro, *et al.*, 2015a).

Los principales factores que inciden en la calidad de la tuna precortada son la pérdida de acidez, de la firmeza, lixiviado de jugos y sobretodo deterioro microbiológico. La descomposición es un peligro considerable, especialmente cuando hay contaminación por microorganismos

patógenos con efectos potencialmente dañinos a la salud del consumidor (Yahia y Saenz, 2011). Cuando la fruta se almacena a la temperatura óptima de 2-5°C, los azúcares solubles totales son bastante estables y en ocasiones incrementan; por otro lado, la acidez titulable y el pH del jugo son también bastante estables pero pueden decrecer (Piga *et al.*, 2000). Las temperaturas más altas reducen el potencial de la vida de anaquel, mientras que el incremento de los requerimientos de O_2 debido a la aceleración del metabolismo pueden no ser completados por la permeabilidad a los gases de los materiales de empaque, conduciendo a incrementos anormales de la acidez titulable, etanol y alteraciones de sabor como resultado de la respiración anaeróbica (Piga *et al.*, 2000).

La baja acidez y alto contenido de azúcares de la tuna - mayor que cualquier otra fruta - la convierten en un sustrato ideal para la proliferación de microbios. Para mantener las poblaciones de bacterias y levaduras debajo de los límites legales de 10^7 y 10^8 CFU g^{-1} establecidos por la legislación española (BOE, 2001), es esencial usar el equipo de proceso adecuado y adoptar programas de sanitización efectivos, con personal entrenado en el proceso higiénico y el mantenimiento de las temperaturas bajas de almacenamiento. La esterilización de la superficie de la fruta antes del pelado es conseguido generalmente con tratamientos de inmersión en hipoclorito de sodio, sin embargo, las nuevas alternativas como el uso de agua electrolizada son más seguras para el trabajador y los consumidores, amigables al ambiente y también más baratas, por lo que están ganando popularidad (Pannitteri *et al.*, 2015).

Assumiendo que las operaciones de proceso mantienen cargas microbianas iniciales bajas, la temperatura de almacenamiento es el factor más importante que influye en la población microbiológica. El rango de temperatura de almacenamiento recomendada de 8-12°C para prevenir daños por frío a la fruta completa no es óptimo para el almacenamiento de tunas procesadas; de hecho, los mejores resultados en términos del mantenimiento de la calidad química, sensorial y microbiológica es 4-5°C (Piga *et al.*, 2000; Corbo *et al.*, 2004; Dell Nobile *et al.*, 2007; Cefola *et al.*, 2014). La permeabilidad de las películas usadas para el empaque y el empaque en atmósferas controladas tiene un impacto menor en la composición química y la población microbiana cuando la fruta se almacena a 4-5°C. Sin embargo los incrementos de temperatura y niveles reducidos de O_2 , combinados con incremento de la concentración de CO_2 , pueden conducir a condiciones anaeróbicas y posteriormente inducir a emisión de volátiles indeseables, que comprometen la calidad sensorial y alteran la población microbiológica cuantitativa y cualitativamente (Piga *et al.*, 2000; Del Nobile *et al.*, 2009).



Según Del Nobile *et al.*, (2009), las cubiertas basadas en alginato de sodio, agar y gel de proteína de pescado, no afectaron las levaduras y bacterias mesofílicas pero estimularon la carga de ácido láctico, las bacterias psicrotróficas y coliformes. Cuando el ácido acético fue combinado con quitosano, se obtuvo una reducción de la población microbiana comparada con la fruta testigo (Ochoa Velasco y Guerrero Beltrán, 2014). La aplicación de cubiertas a la tuna no es común a nivel comercial y la literatura no indica que se obtengan beneficios claros ni consistentes de su aplicación (Del Nobile *et al.*, 2009; Ochoa Velasco y Guerrero Beltrán, 2014; Palma *et al.*, 2015).

La respuesta al almacenamiento también puede ser afectada por la etapa de madurez y la época de cosecha de la fruta. La calidad completa de la cosecha de verano declina más rápido que la cosecha tardía de *scozzolatura*, mientras que la fruta cosechada en madurez comercial mantiene la calidad por más tiempo que la cosechada más tarde completamente madura, especialmente en el caso de fruta que proviene de *scozzolatura*. La población de bacterias mesofílicas aeróbicas y moho son más afectadas - si bien de diferente modo - por la etapa de madurez que por la época de cosecha. La fruta cosechada muy madura muestra mayores conteos que la fruta cosechada en madurez comercial (Allegra *et al.*, 2015).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Mientras que se ha visto una mejora general en las prácticas de manejo de huertas en las dos décadas pasadas, todavía queda mucho por hacer para convencer a los productores que la tuna puede alcanzar altos rendimientos y buena calidad si recibe atención y cuidado apropiados - justo como cualquier otro cultivo -. Esperamos que proveyendo la información técnica y científica más reciente sobre el cultivo y el manejo postcosecha de la fruta, la productividad y especialmente los estándares mundiales de la tuna mejoraran, permitiendo que compita en condiciones similares con otras frutas importantes en los mercados mundiales. Para atraer otros consumidores y crear mayor demanda, es necesario contar consistentemente en los mercados con fruta de alta calidad. Se debe de dar atención especial a las prácticas agronómicas que afectan potencialmente a la calidad de la fruta ya sea en pre o postcosecha.



Figura 1

Eliminación de espinas de tunas por medio de cepillos rotatorios, además de remover las espinas hacen el fruto más brillante.

**Figura 2**

Mesa de clasificación y empaque de la fruta.

**Figura 3**

Daños por frío mostrado con manchas típicas y tejido hundido debajo de la epidermis, la cascara alrededor de la cicatriz del receptáculo.

**Figura 4**

Síntomas de daño por frío en forma de agujeros y cicatrices color café oscuro.

**Figura 5**

Agrietamiento del fruto como efecto del almacenamiento a altos niveles de humedad.

**Figura 6**

Pudrición blanda de la tuna comenzando en el área cercana al corte.





Figura 7
Agrietado de fruta ocurrido en fruta almacenada a niveles altos de humedad.



Figura 8
Soft rot on cactus pear starting from the stem end.

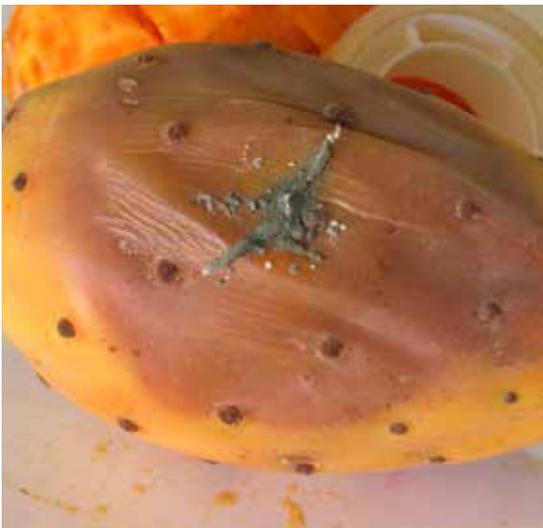


Figura 9
*Pudrición causada por *Penicillium* spp., durante almacenamiento en frío por largo tiempo.*



Figura 10
*Pudrición (*Alternaria* spp.) durante almacenamiento en frío por largo tiempo.*



Figura 11
Preparación de tunas listas para el consumo: los frutos son pelados manualmente y colocados en charolas de plástico (a) y sellados con una película de polímero (b).



Producción y utilización de nopal forrajero en la nutrición animal

Jose C.B. Dubeux Jr.^a, Hichem Ben Salem^b y Ali Nefzaoui^c

^a University of Florida, North Florida Research and Education Center, Marianna, USA

^b Institute Nationale de la Recherche Agronomique. Universite et Carthague. Ariana. Tunes.

^c International Center for Agricultural Research in the Dry Areas, Tunis, Túnez



Producción y utilización de nopal forrajero en la nutrición animal

INTRODUCCIÓN

La producción de ganado permanece como la principal fuente de ingreso de las poblaciones rurales de las zonas secas. Es un componente clave de los sistemas de producción resilientes y es un indicador de riqueza. Sin embargo, el sector enfrenta numerosos retos incluyendo la disponibilidad de alimento y el cambio climático. Los pastizales en las regiones semiáridas juegan un papel importante en los sistemas de producción pecuaria, aunque su contribución a la alimentación animal está decreciendo. La productividad de los pastizales es usualmente baja (<5 ton de materia seca (MS) ha⁻¹ año⁻¹) con bajos rendimientos de materia consumible (< 1 ton MS ha⁻¹ año⁻¹), conduciendo a una baja capacidad de

carga animal (12-15 ha para sostener una vaca adulta) (Dubeaux *et al.*, 2015a). Las especies perennes adaptadas son una opción potencial para mejorar la disponibilidad de forraje en zonas secas. La población mundial de ganado ha disminuido de manera sostenida en décadas recientes, como resultado de la degradación

de los pastizales. La escasez de agua es otro factor limitante importante, que amenaza la sustentabilidad de los sistemas de producción ganadera. Las proyecciones globales indican que el uso urbano del agua incrementará en las próximas décadas, y como consecuencia quedará menos agua para la agricultura y ganadería.

En este escenario, el nopal se transforma en uno de los cultivos más prominentes del siglo XXI. El nopal una especie suculenta tolerante a sequía, puede producir >20 ton ha⁻¹ de MS y proveer 180 ton ha⁻¹ año⁻¹ de agua almacenada en sus cladodios, representando una opción efectiva en costos de proveer agua a los animales (Dubeaux *et al.*,

2015b). En tales niveles de productividad es posible producir suficiente forraje para sostener cinco vacas adultas por año,- un incremento de 60 veces de la productividad el pastizal-. Con plantaciones pequeñas de nopal manejadas intensivamente, es posible producir alimento y reducir la presión en pastizales sobrepastoreados.

Sin embargo, el potencial del nopal permanece insuficientemente explotado. Las principales especies de nopal usadas para forraje incluyen *Opuntia ficus-indica* Mill., y *Nopalea cochenillifera* Salm-Dyck., que poseen varias variedades disponibles en diferentes países.

Existen reportes del uso exitoso del el nopal como alimento animal en países como Brasil y México así como Sudáfrica y Túnez, usualmente soportados por programas fuertes de investigación y extensión. Para que fueran exitosos fue necesario involucrar a todos los actores de la cadena productiva, incluidos los productores, proveedores de insumos, tiendas e instituciones de investigación y extensión y los funcionarios. El mercado de alimentos para animales está creciendo e implica cada vez menos riesgos en comparación con la producción de fruta u hortalizas, representando por lo tanto potencial empresarial. En algunos países, los cladodios obtenidos de la poda de huertas de nopal tunero son usados como alimento de ganado, complementando el ingreso de los productores. En general, el potencial del nopal como forraje en zonas semiáridas esta subutilizado. Existen tremendas oportunidades para desarrollar sistemas de producción pecuaria basadas en nopal, ayudando a la población humana y reduciendo la presión sobre los pastizales naturales.

SISTEMAS DE PRODUCCION DE FORRAJE BASADOS EN NOPALS

Dada la falta de información sobre la superficie ocupada por nopal en diferentes zonas agroecológicas, no es posible realizar una evaluación completa de su importancia en los diversos sistemas de producción. Por ejemplo, los datos sobre nopales nativos o su papel en cercos defensivos y corrales es importante pero rara vez reportado.



Figura 1
Nopal silvestre en San Luis Potosí, México
(Foto: Ali Nefzaoui)

Nopales nativos

La mayor área cubierta por nopales nativos se encuentra en México y se estima que cubre 3 millones de hectáreas. El ganado frecuentemente pastorea en las nopaleras sin que se use un tratamiento especial. En algunos países, los nopales se han tornado en plantas invasivas y las plantaciones son usadas en la misma forma que las plantaciones nativas - ejemplos existen en Tigray, Etiopía - donde el ganado pastorea directamente el nopal con espinas.

Cercos defensivos y corrales

Se conoce poco de este tipo de plantaciones pero claramente juegan un papel importante en muchos países, especialmente el África del norte, partes de Italia y España, donde existen muchas granjas protegidas por cercas biológicas usando nopales espinosos.

Además de ser muy efectivas en la protección de predios, las cercas vivas son una pieza importante de la socioeconomía local, manteniendo los derechos de propiedad de la tierra en regiones y países donde impera la propiedad colectiva, como África del Norte. Las cercas de nopales son plantadas frecuentemente como prueba de la propiedad privada. Además, contribuyen al control de la erosión, particularmente cuando son establecidas siguiendo el contorno del terreno (Le Houerou, 2002).

Estas plantaciones de nopal también toman la forma de corrales rodeando las casas rurales. Esta clase de plantaciones muy densas representan alimento para el ganado doméstico, proveyendo asimismo fruta para el autoconsumo además de refugio y sombra para las gallinas.

Doble utilidad fruta y forraje

Este es el sistema más común y disperso, está presente en todos los países donde las condiciones ambientales favorecen el crecimiento del nopal y donde el cultivo de la planta forma parte del conocimiento y la tradición local. Existen dos tipos de plantaciones; huertos intensivos especializados en producción de fruta, donde el objetivo es producir fruta de buena calidad para el mercado local o de exportación; y las huertas manejadas con cuidados mínimos, cuya fruta es para autoconsumo o para el mercado local. En ambos casos, la poda provee grandes cantidades de cladodios que son vendidos y/o utilizados en la misma granja para alimentar el ganado.

Rehabilitación de pastizales

El mejoramiento de los pastizales usando nopal sin espinas ha sido practicado principalmente en África del Norte desde la década de 1930-1940. Le Houerou (2002) reporto que las plantaciones de nopal fueron desarrolladas sistemáticamente, en particular en Túnez, basados en los resultados de investigación obtenidos por Griffiths y colaboradores en Texas, EUA. En 1932 el gobierno de Túnez invito a Griffiths quien aplico sus 30 años de experiencia en el uso de nopal como forraje en la parte central de Túnez para mitigar los efectos de la sequía en el ganado. Al mismo tiempo se permitió la asignación de tierras con la condición de que los beneficiarios contratantes, plantaran 10% de la tierra asignada con nopal sin espinas para usarse como buffer de emergencia y reserva de forraje vivo. Esta medida resulto una decisión sabia, luego que el país enfrente tres años de sequía severa durante 1946-1948, época en que se perdió el 70-75% del ganado - excepto en aquellas explotaciones que poseían nopal (Le Houerou (2002).

Desde el punto de vista agronómico, para rehabilitar o mejorar un pastizal, matorral o selva o áreas agrícolas pobres caracterizadas por suelos delgados, pedregosos, en pendiente o arenosos, o donde el clima es muy caliente para practicar agricultura, se debe de contar con una estrategia planeada; usar densidades de 1 000-2 000 cladodios individuales o brazos de doble cladodio por hectárea, colocándolos en hileras espaciadas a 5-7 m y 1-2 m entre plantas. En general no se requieren tratamientos especiales; e.g. aplicación de fertilizantes, poda o tratamientos fitosanitarios. Se puede aplicar riego suplementario durante el establecimiento - pero únicamente si el primer año es muy seco-. Estas plantaciones son utilizables después de 3-4 años y alcanzan el completo desarrollo después de 7-10 años, si son manejadas racionalmente pueden permanecer productivas por más de 50 años.

La productividad de un pastizal plantado con nopal puede incrementarse por un factor de 1 a 10, cuando está muy degradado, y de 1 a 5 cuando está en buenas condiciones (Le Houerou, 2002); resultados similares fueron reportados por Nefzaoui y El Mourid (2009). En la región central de Túnez se han obtenido resultados más impresionantes con arbustos de crecimiento rápido como *Acacia cyanophylla* o nopal (*Opuntia ficus-indica*). (Tabla 1).



TABLA 1 Productividad de un pastizal natural y uno mejorado en Túnez (Nefzaoui y El Mourid, 2001).

Tipo de pastizal	Productividad (unidad de forraje ha ⁻¹ año ⁻¹) ^a
Pastizal natural en Dhahar Tataoouine (100 mm de lluvia)	35-100
Pastizal privado mejorada con cultivo de nopal en Ouled Farhane Túnez (250 mm de lluvia)	800-1 000
Pastizal en cooperativa mejorado con <i>Acacia cyanophylla</i> , Guerritz, Túnez. 200 mm de lluvia	400-500

^a Una unidad de forraje es equivalente a la energía metabolizable provista por 1 kg de grano de cebada (12.4 MJ kg⁻¹ MS)

Pocas especies vegetales son capaces de incrementar la productividad de la tierra en tasa tan alta, especialmente en tierras marginales caracterizadas por su baja eficiencia de uso de la lluvia (RUE) medida en kg de materia seca (MS) por mm⁻¹ por año⁻¹, por ejemplo (Le Houerou, 1984);

- pradera mediterránea natural degradada; RUE= 1-3
- pradera en buena condición: RUE=4-6
- pradera desértica; RUE= 0.1-0.5

El nopal sin embargo, posee una RUE alta. Un pastizal rehabilitado con *O. ficus-indica* exhibe una RUE de 10-20 kg de MS superficial por ha⁻¹ año⁻¹, en zonas áridas donde la lluvia varía de 200 a 400 mm año⁻¹.

Cultivos intercalados

La expansión del cultivo de cereales hacia pastizales y la reducción de la práctica del descanso de tierras son las razones principales del declive de la fertilidad del suelo y la erosión eólica. Un modo de combatir la degradación resultante del monocultivo de cereales es la introducción de leguminosas forrajeras adaptadas, arbustos forrajeros y nopal en los sistemas de cultivo (Nefzaoui *et al.*, 2001).

El cultivo intercalado es una práctica agroforestal donde los cultivos perennes son cultivados simultáneamente con cereales que requieren labranza como la cebada y la avena. Los arbustos, árboles o nopal son cultivados en bandas anchas (e.g. 10-15m) colocando el otro cultivo en el espacio intermedio. Los cultivos intercalados son una variante de los cultivos intercalados en setos. Se prefieren leguminosas o árboles de crecimiento rápido o arbustivas (Saraiva, 2014). Las leguminosas arbóreas mejoran los atributos del suelo (e.g. reciclado de nutrientes, fijación biológica de N₂), supresión de malezas y control de la erosión de tierras en pendiente. Este sistema permite al productor continuar cultivando la tierra mientras que los árboles o arbustos intercalados ayudan a mantener la calidad del suelo. Los nopales actúan como barreras rompevientos, resultando en una mejora del rendimiento de pastos y cereales. Las bandas anchas permiten a los animales pastorear el estrato de biomasa o los residuos de cereales en el verano, y la cosecha de cladodios que son troceados y ofrecidos directamente a

los animales como suplemento energético a los residuos de baja calidad (Nefzaoui *et al.*, 2011).

Si se manejan apropiadamente, los cultivos intercalados pueden proveer ingreso en diferentes intervalos de tiempo para diferentes mercados en una manera sustentable y de conservación. Los diseños intercalados pueden también hacer un mejor uso del espacio disponible entre hileras de árboles y agregar protección y diversidad agrícola a los campos.

Existe baja adopción de los nopales como monocultivo por varias razones, desde el diseño técnico de las plantaciones y el manejo deficiente, a la competencia por tierra dedicada a cultivos de cereales. Sin embargo, el cultivo intercalado subsana estas limitaciones debido al:

- aumento de la fertilidad del suelo;
- incremento del rendimiento del cultivo;
- reducción de la presencia de malezas;
- mejoramiento de la productividad animal.

Sin embargo, los nopales poseen alta eficiencia de uso de la lluvia (RUE), praderas rehabilitadas con *O. ficus-indica* exhibieron una RUE de 10-20 kg de MS superficial ha⁻¹ año⁻¹ en áreas que reciben de 200 a 400 mm de lluvia por año⁻¹.

El cultivo en bandas permite la diversificación y los productores pueden beneficiarse de varios mercados. También promueve la sustentabilidad del cultivo y la producción animal incrementando la productividad de la tierra y reduciendo los riesgos climáticos comparados con el cultivo de especies anuales. Los beneficios del cultivo de nopal-cebada en bandas alternas fueron evaluados en Túnez (Alary *et al.*, 2007). Comparado con cultivo de cebada sola, la biomasa total (grano y paja) de cebada cultivada entre hileras de nopal sin espinas incremento de 4.24 a 6.65 ton ha⁻¹ y el grano de 0.82 a 2.32 ton por ha⁻¹. Estos resultados reflejan el impacto del microambiente creado por el cultivo intercalado con nopal, en particular el efecto positivo como "barrera rompevientos" que reduce la pérdida de agua e incrementa la humedad del suelo. El cultivo de cebada estimuló un incremento en el número de cladodios y frutos, mien-



tras que el nopal incremento la aporte de raíces a la materia orgánica del suelo.

Las leguminosas arbóreas son otra opción para el cultivo intercalado con nopal. Estas plantas aportan N al sistema, proveyendo proteína y fibra a las dietas animales basadas en nopal. En Brasil, la *Gliciridia sepium* o *Leucaena leucocephala* fueron

usadas con nopal y comparadas con nopal como unicultivo. La adición de leguminosas no cambio la biomasa total, pero proveyó una fuente diversa de alimento (**Tabla 3**). El nopal y las leguminosas pueden ser cultivadas en zonas semiáridas, reduciendo la dependencia de granos foráneos e incrementando la seguridad alimentaria.

TABLA 2 Cambios en la biomasa total y rendimiento de cebada en Sidi Bouzida^a, Túnez

tratamiento	Pradera natural	Cebada sola	Nopal solo	Cebada + nopal en bandas
Biomasa superficial (Ton ha ⁻¹)	0.51	0.53	1.87	7.11
Biomasa subterránea (ton ha ⁻¹)	0.33	0.11	1.8	1.98
Grano de cebada (ton ha ⁻¹)		0.82		2.32
Grano + paja + hierbas (ton ha ⁻¹)		4.24		6.65

^a Promedio de lluvia en Sidi Bouzid es 250 mm año⁻¹. No se usaron fertilizantes. Allary *et al.*, (2007).

TABLA 3 Productividad de biomasa en cultivos intercalados con nopal y *Gliciridia sepium* o *Leucaena leucocephala* en Pernambuco, Brasil

Sistema de cultivo	Biomasa de nopal	Biomasa de <i>Gliciridia</i>	Biomasa total
	Ton MS ha ⁻¹ año ⁻¹		
Nopal + <i>Gliciridia</i>	13.6 ^a	4.2 ^a	17.8 ^a
Nopal + <i>Leucaena</i>	14.0 ^a	2.6 ^b	16.6 ^a
Nopal	16.9 ^a	–	16.9 ^a
Error estándar	1.0	0.2	0.8

^{a,b} medias en la misma columna seguidas de la misma literal no difieren. Tukey 5%. Fuente: Saraiva (2014).



Figure 2
Ejemplo de la técnica de cultivo intercalado usando *O. ficus-indica* y maíz (Foto: Jaime Mena)

Figura 3

Cultivo intercalado con nopal y Gliciridia sepium en Pernambuco, Brasil. Las leguminosas arbóreas fueron plantadas en hileras y los nopales en medio de las hileras (Foto: Jose Dubeux)

**Figura 4**

Plantación de nopal para producción de forraje (arriba detalles del sistema de riego y el equipo para fertirrigación (Zacatecas, México)



Sistemas intensivos (con y sin riego a alta densidad)

La producción intensiva de nopal forrajero esta restringida a pocos países, es prevalente en el Noreste de Brasil y en pocas áreas de México. La **Figura 4** ilustra un ejemplo extremo de intensificación en México, donde el nopal es cultivado con riego por goteo y fertirrigación en una explotación lechera.

Las experiencias recientes de Brasil indican que aplicando 10mm mes^{-1} de riego por goteo ($2.5\text{ mm semana}^{-1}$) usando agua colectada en una olla de agua en el sitio, incrementa la productividad y permite el cultivo de nopal en donde no era posible debido a las altas temperaturas nocturnas y la falta de humedad del suelo (Lima *et al.*, 2015).

PRACTICAS DE CULTIVO

Adaptación ecológica

Las opuntias son nativas de un amplio rango de ambientes, desde el nivel del mar en el desierto de California hasta los 4700 msnm en los Andes peruanos, de las áreas tropicales de México con temperaturas por encima de 50°C hasta lugares en Canadá donde las temperaturas son tan bajas como -40°C (Nobel, 1995). Mientras los nopales requieren suelos con alta fertilidad para alcanzar su potencial de rendimiento, también son capaces de crecer en suelos pobres. Sin embargo, si necesitan suelos con buen drenaje y no toleran los suelos salinos (Berry y Nobel, 1985).

Los nopales poseen el mecanismo fotosintético MAC (Mecanismo del Ácido Crasuláceo), cuando son expuestos a estrés hídrico, los nopales abren sus estomas únicamente en la noche para reducir la pérdida de agua. Por lo tanto, las noches más frescas ($15\text{-}20^{\circ}\text{C}$) son más benéficas para su desarrollo comparadas con noches más calientes ($>25^{\circ}\text{C}$). Las temperaturas más altas incrementan la capacidad del aire para retener vapor de agua, reduciendo así la humedad relativa. El efecto opuesto, temperaturas más frescas incrementan la humedad relativa y reducen la pérdida de agua de los nopales. Nobel en (1995) señaló que una reducción en la capacidad de retención de agua atmosférica de 39.7 g m^{-3} a 35°C y únicamente 6.8 g m^{-3} a 5°C . Dado que las temperaturas nocturnas también están relacionadas con la altitud, los nopales crecen mejor en las altiplanicies, debido a que hay menor pérdida de agua en las noches frescas. Rocha (1991) indicó que por cada m de elevación hay una reducción de 0.65°C en la temperatura promedio.

Opuntia y *Nopalea* muestran el potencial más alto para la producción de forraje comparados con otras especies de cactáceas. Las *Nopalea* frecuentemente requieren

más lluvia ($>600\text{ mm año}^{-1}$). La interacción entre la lluvia y la temperatura y los efectos de altitud afecta el comportamiento del crecimiento del nopal; a mayor altitud con noches frescas, este requiere menos lluvia que en sitios con noches más calientes.

Plantación y variedades

Los nopales se propagan vegetativamente. Usualmente se usan cladodios como material vegetativo así se preserva la identidad genética de la planta donadora. Al establecer una plantación, se deben de considerar varios factores, incluyendo la variedad de nopal, tipo de cladodio, (basal, secundario o terciario), número y posición de cladodios, época de plantación, distancias y método de plantación, control de malezas, fertilización, y ocurrencia de plagas y enfermedades. Las prácticas de manejo usualmente interaccionan por lo que deben ser cuidadosamente analizadas en un enfoque de sistemas.

Se deben usar las variedades indicadas para la producción de forraje adaptadas a ambientes específicos. Los ensayos de variedades son recomendados para diferentes regiones para poder seleccionar aquellos de mejor comportamiento. Es importante también considerar la prevalencia de enfermedades y plagas en algunas regiones y seleccionar la mejor variedad en este aspecto. En Brasil, por ejemplo, las variedades comunes incluían "Gigante" y "Redonda" (*Opuntia ficus-indica* Mill.), pero un brote de cochinilla (*Dactilopius opuntiae* Cockerell) condujo a un cambio en la variedad recomendada. Los productores de la región están plantando variedades tolerantes a este insecto ("Orelha de elefante Mexicana" - *Opuntia* spp.; "Miuda" - *Nopalea cochellinifera* Salm-Dick). Este es un ejemplo de enfoque integrado, tomando en consideración las diferentes limitaciones ambientales al seleccionar la variedad más conveniente.

Una vez que ya se ha identificado la mejor variedad, la selección del sitio es clave para asegurar el éxito. Se deben de considerar las características ecológicas, y el sitio debe poseer un suelo bien drenado y fertilidad balanceada (Dubeaux y Santos, 2005).

La plantación tiene lugar usualmente en el último tercio de la época seca para reducir la incidencia de patógenos, que son más comunes en época de lluvias (Inglese, 1995; Farías *et al.*, 2005). Los cladodios de nopal plantados durante la estación seca son capaces de desarrollar raíces iniciales muy rápido, reduciendo así la incidencia de enfermedades comunes durante la estación húmeda. Cuando se colecte material para propagación, Mondragon Jacobo y Pimienta Barrios (1995) recomiendan dejarlo en un lugar seco y sombreado por 4-6 semanas para permitir la cicatrización de la zona de corte y reducir incidencia de pudriciones. En Brasil, es suficiente colocarlos en la sombra por 5-7 días para conseguir buenos



resultados (Farias *et al.*, 2005). Se pueden usar fungicidas (Thiabendazol al 60% o caldo bordes) para reducir la incidencia de enfermedades fungosas (Mondragon Jacobo y Pimienta Barrios, 1995; Farias *et al.*, 2005). Los cladodios maduros de la porción intermedia de la planta son los mejores para la propagación (Tapia, 1983).

Si existe maquinaria, los nopales pueden ser plantados en surcos de 15-20 cm de profundidad. Sin embargo es común usar azadón y cavar hoyos individuales, particularmente en predios pequeños, usando un cladodio por sitio. El uso de más cladodios por sitio puede resultar en mayores rendimientos, pero los costos de plantación no siempre justifican el uso de dos o tres veces más material vegetativo (Mafra *et al.*, 1974). Asimismo, se pueden usar mitades de cladodio, pero la productividad usualmente se reduce, especialmente en la primera cosecha (Medeiros *et al.*, 1997). Dependiendo de la variedad, el tamaño de los cladodios varía, en un rango de 0.5 a 1 kg para la mayoría de las variedades de nopal, aunque en ocasiones se pueden encontrar cladodios más pesados. Los cladodios de *Nopalea* son usualmente menos pesados (0.3-0.7 kg).

La posición del cladodio afecta su establecimiento, Mafra *et al.*, (1974) probó tres posiciones; horizontal, vertical y diagonal sin encontrar diferencias en la producción de biomasa. Se observó colapso de las plantas cuando el cladodio fue colocado horizontalmente al momento de la plantación. Por lo anterior los autores recomiendan la plantación de posición vertical o diagonal, enterrando un tercio del cladodio. La orientación - norte sur (N-S) y E-W de los cladodios puede ser importante. Rodríguez *et al.*, (1975) observaron que los cladodios orientados N-S producen menos que los cladodios orientados E-W, atribuyendo esta respuesta a la mayor interceptación de luz con la orientación E-W. por otro lado en Brasil, algunos estudios no indicaron diferencias entre plantar los cladodios orientados E-W o N-S. los cladodios jóvenes pueden tomar diferentes direcciones, conduciendo a una arquitectura única que optimiza la interceptación de luz. Es importante que la plantación siga el contorno del terreno, particularmente en sitios con pendiente pronunciada, los nopales deben de orientarse contra la pendiente para reducir la erosión del suelo.

El espacio recomendado entre plantas varía de acuerdo al sistema de producción y el ambiente. El nopal puede ser plantado como cultivo único o intercalado con cultivos comerciales. Farias *et al.*, (1989) probaron diferentes espaciamientos de nopal intercalado con sorgo (*Sorghum bicolor* L.). los cladodios fueron espaciados a 3 x 1 x 0.5 o 7 x 1 x 0.5m y el sorgo plantado entre las hileras. El nopal produjo menos biomasa en el espaciamiento más amplio, pero el sorgo compensó por la pérdida. Si hay maquinaria disponible, debe de ser considerada antes de escoger el espaciamiento óptimo, lo cual puede variar entre localidades. En zonas más secas

el espacio debe ser más amplio de modo que las plantas individuales puedan desarrollar una mayor masa de raíces, reduciendo así los riesgos durante los periodos de sequía (Dubeaux *et al.*, 2011a).

Los sitios con mejor fertilidad de suelos, y más lluvia son los más adecuados para sostener altas densidades de plantación de nopal. Souza (2015) observó un incremento lineal en materia seca de *Nopalea cochellinifera* cuando se incrementó la densidad de plantación de 10 417 plantas (plantadas a 1.2 x 0.8) a 83 333 plantas ha⁻¹ (plantadas a 1.2 x 0.1 m). La respuesta lineal al espaciamiento entre plantas también fue observado por Silva (2012) con *O. ficus-indica* cuando la densidad de plantación varió de 20 000 a 160 000 plantas ha⁻¹. La aplicación de altas dosis de abono orgánico se asoció con respuestas aún más grandes (80 ton ha⁻¹ de estiércol vacuno).

Fertilización

El nopal (*Opuntia* y *Nopalea*) tienen un alto potencial productivo, el cual es alcanzado únicamente cuando se provee de fertilización adecuada (Silva, 2012). La extracción de nutrientes por el nopal forrajero es alta debido a la extracción de cladodios en operaciones de corte y acarreo. La concentración de nutrientes en los cladodios de nopal varía con el cultivar, condiciones ambientales y el manejo. Considerando una concentración promedio (en base seca MS). De 0.9%, N; 0.16%, P; 2.58, K; y Ca de 2.35% (Santos *et al.*, 1990) y una productividad anual de 20 ton de MS ha⁻¹ año⁻¹, los nutrientes exportados (kg ha⁻¹ año⁻¹) vía el material cosechado podría ser de 180 kg de N, 32 kg de P, 516 kg de K y 470 kg de Ca, sin considerar otros macro y micronutrientes (Dubeaux y Santos, 2005). Por lo tanto, esta demanda de nutrientes debe de ser mantenida para que el sistema sea sustentable en el tiempo.

El nopal frecuentemente responde mejor a la fertilización orgánica que a la fertilización mineral (Mendez Gallegos y Martínez Hernández, 1988; Santos *et al.*, 1996). Usualmente existe una interacción entre la dosis de fertilización, espaciamiento entre plantas y condiciones ambientales, entre más alta sea la densidad de plantación, mayor será la necesidad de fertilizantes. El cultivar "IPA-20" (*Opuntia ficus-indica* Mill.) presenta respuestas lineales hasta 80 ton ha⁻¹ de estiércol vacuno, con una densidad de plantación de 160 mil plantas ha⁻¹. Respuestas aún más altas fueron observadas con la combinación de altas dosis de estiércol y altas densidades de plantación. Este tipo de sistemas de producción intensiva pueden alcanzar una productividad anual de >5 ton DM ha⁻¹ (Silva, 2012). Los productores del noreste de Brasil sin embargo, aplican usualmente 20-30 ton ha⁻¹ de estiércol. De hecho los pequeños productores no tienen acceso a grandes cantidades de estiércol además de la disponibilidad de tiempo y mano de obra.



El estiércol debe de ser incorporado en el suelo (Inglese, 1995); Mondragon y Pimienta Barrios, 1995) o aplicado sobre la superficie durante la plantación y después de cada cosecha. Saraiva *et al.*, evaluaron diferentes fuentes de estiércol (vacuno, ovino, y caprino y pollinaza) en el desarrollo del nopal (*Nopalea cochenillifera* Salm-Dick). Los estiércoles fueron aplicados a la misma dosis (200 kg de N ha⁻¹)- aunque dado que la concentración de N difiere entre fuentes, la cantidad de cada estiércol fue diferente- y no se observaron diferencias en la productividad del nopal. Berry y Nobel (1985) evaluaron el estrés mineral en dos especies de nopal (*O. ficus indica* y *Ferocactus acanthodes*) observando que estas especies no requieren altos niveles de Ca en la solución del suelo. De hecho, su desarrollo no fue afectado cuando el pH del suelo fue de 4.5-8.5. Se detectaron altos niveles de Ca reflejado en altos niveles de oxalato de Ca. El potasio es el nutriente extraído en mayores cantidades debido a su alta concentración en los cladodios de nopal. Por lo tanto, es esencial reponer el K del suelo después de cada cosecha para mantener la productividad del nopal.

Una combinación de fertilizantes orgánicos y minerales puede ser la mejor opción cuando la disponibilidad de estiércol es baja. Dubeaux y Santos (2005) estimaron que el déficit de nutrientes que ocurre en una plantación de nopal con altas densidades de plantación (40 mil plantas ha⁻¹) y alta productividad (20 ton MS ha⁻¹ año⁻¹) si se aplican únicamente 20 ton ha⁻¹ de estiércol vacuno. Nobel *et al.*, (1987) observaron incremento en la productividad (*Opuntia engelmannii* Salm-dick) con la aplicación de 160 kg de N ha⁻¹ y 80 kg de P ha⁻¹.

Estos autores encontraron que el boro incrementa significativamente el rendimiento de nopal. Nobel (1995) señala que el N, P, K, B y Na son los nutrientes que ejercen la mayor influencia en la productividad del nopal. Baca Castillo (1988) reporto que en orden de importancia el P, N, Ca, B, Mg, Fe y Mn son los nutrientes principales con mayor efecto en el crecimiento del nopal. De hecho Dubeaux *et al.*, (2006) observo un incremento lineal en la productividad de *O. ficus-indica* hasta los 300 kg de N ha⁻¹ año⁻¹ en diferentes sitios de la región semiárida de Brasil. Esto autores notaron que la fertilización con N incremento la concentración de N en los cladodios y mejoro la eficiencia de uso de la lluvia. La fertilización con P tuvo respuestas positivas en rendimiento únicamente cuando el P del suelo fue <10 mg kg⁻¹.

Lo suelos salinos no son adecuados para el cultivo de cactus, nopal (*O. ficus-indica*) ni *Nopalea*, ya que reducen el crecimiento de los brotes y las raíces (Nerd *et al.*, 1991c; Calderon y Paniagua *et al.*, 1997). Berry y Nobel (1985) mostraron que las raíces de *O. ficus-indica* Mill., exhiben estrés salino cuando la concentración de NaCl alcanza 25 nM, reduciendo el crecimiento de cladodios.

Manejo de malezas

El control de malezas es esencial para incrementar la productividad del nopal. Esta planta posee raíces superficiales que se dispersan horizontalmente. En condiciones favorables, las raíces pueden alcanzar una profundidad de 30 cm y un cubrir horizontalmente un radio de 4-8 m (Sudzuki Hills, 1995). Por lo tanto compiten con el nopal por nutrientes,



Figura 5
Cosecha, transporte y utilización de nopal en el estado de Pernambuco, Brasil. (Foto: José Dubeaux)

humedad y luz. Fariás *et al.*, (2005), probaron diferentes métodos de control de malezas en el desarrollo del nopal (*O. ficus-indica* Mill.) cv. "IPA-20". Cuando las malezas no fueron controladas, el nopal produjo únicamente 3 ton ha⁻¹ MS, comparada con 12 ton MS ha⁻¹ obtenidos con el mejor tratamiento (Tebuthiuron aplicado como herbicida pre-emergente a 2 L ha⁻¹). De este modo el control químico cuadruplico el rendimiento del nopal. El control mecánico no fue tan eficiente como los herbicidas preemergentes; Diuron, Tebuthiuron, o la combinación de Simazine y Ametryne. Si las malezas poseen potencial como forraje de calidad, es posible evitar la aplicación de herbicidas y en su lugar henificarlas para incluirlas junto con el nopal para alimentar los animales. Sin embargo, este enfoque resulta en menor productividad del nopal (Fariás *et al.*, 2005). Felker y Russell (1988) indicaron que el glifosato puede ser usado a dosis de 20 g litro⁻¹ para *O. lindheimeri* sin causar daños. Estos autores también indicaron que la Hexacinone, Simazina y Tebuthiuron promueven mejores rendimientos en esa especie. El espaciamiento entre plantas es importante para el control mecanizado de las malezas. En Brasil, el espacio entre plantas usado recientemente es de 1.6x0.2m para *Opuntia* y 1.2 x0.2 para *Nopalea* (Silva 2012, Souza, 2015).

Cosecha

El manejo de la cosecha de nopal debe tener una consideración importante, la intensidad de cosecha, la frecuencia y el momento, la interacción entre estos factores afecta la brotación del nopal. Se han conducido varios experimentos sobre cosecha en el noreste de Brasil para determinar la mejor estrategia que maximice el crecimiento Lima *et al.*, 1974; Santos *et al.*, 1996, 1998; Fariás *et al.*, 2000). En general el incremento en frecuencias de cosecha requiere la reducción de la intensidad de la cosecha y estos dos factores interactúan con la densidad de plantación. En el caso del nopal el área fotosintética residual - que queda después de la cosecha - es crítica para incrementar el rebrote de la planta. Los ensayos de campo revelan que una baja área de cladodios (CAI) reduce la interceptación de luz y el crecimiento de la planta. Nobel, (1995) sugiere que un CAI entre 4 y 5 incrementa la productividad del nopal. En la medida del CAI se consideran ambas caras del cladodio. Entre más alta sea la densidad de plantación más alto será el CAI, resultando en incrementos de la productividad cuando no existen otros factores limitantes del crecimiento. Fariás *et al.*, (2000) observaron que cuando el nopal (*O. ficus-indica* Mill.) fue cosechada cada 4 años, no hubo diferencia entre preservar los cladodios primarios y secundarios. Por otro lado cosechando cada 2 años, requiere una cosecha menos intensa considerando la preservación de todos los cladodios secundarios. Sin embargo, el experimento fue

realizado con una población de <10 000 plantas ha⁻¹, con una densidad de plantación más alta, es posible que se realicen cosechas más frecuentes debido al mayor CAI residual. Souza (2015) observo que la productividad incremento con el incremento de la densidad de plantación ($\leq 83\ 000$ plantas ha⁻¹), cosechando en años alternados y preservando los cladodios primarios. Sin embargo, los sistemas intensivos, requieren de mayor cantidad de abonos orgánicos.

El nopal es usualmente cosechado en la temporada seca, cuando el alimento para el ganado esta escaso. En los sistemas de producción más intensivos, el nopal es considerado un componente de la dieta del ganado a través del año, pero el suministro continuo de nopal no es común en la mayoría de las regiones. Usualmente los productores aprovechan de los pasturas y praderas durante la época de lluvias, dejando el nopal para la época seca. Durante la época de lluvias, la humedad contenida en los cladodios aumenta y hay más probabilidades de incidencia de patógenos sobre la zona de corte de los cladodios, resultando en mayores problemas de enfermedades.

Riego

La irrigación no es común en los huertos de nopal forrajero, en algunas regiones con poca lluvia y altas temperaturas nocturnas el crecimiento del nopal es limitado, la aplicación de pequeños volúmenes de riego ha fomentado la expansión del área plantada con nopal. Dubeaux *et al.*, (2015b) reportaron que el uso de riego por goteo (únicamente 10 mm mes⁻¹) resulto en rendimientos anuales de MS de ≤ 19.6 ton ha⁻¹ en una región donde previamente no era posible el cultivo de nopal forrajero debido a la lluvia escasa y altas temperaturas nocturnas.

La concentración de sales en el agua de riego es un problema, la aplicación de pequeñas cantidades de agua y el uso de abonos orgánicos reduce el problema de salinización. Snyman (2004) observo que la aplicación de únicamente 13.6 y 11.6 mm a *O. ficus-indica* y *O. robusta*, respectivamente, fue suficiente para llenar los cladodios de planta sujetas a déficit hídrico. En sistemas de temporal, la eficiencia de uso de la lluvia (RUE) varía de acuerdo al ambiente y las prácticas de manejo. Dubeaux, *et al.*, (2006) reportaron una RUE promedio de 18 kg ha⁻¹mm⁻¹, con valores que fluctuaron entre 5 a 35 kg ha⁻¹ mm⁻¹.

Productividad

El nopal puede alcanzar alta productividad en agroecosistemas de temporal. Un sistema de temporal en el Noreste de Brasil alcanzo una producción de >50 ton MS ha⁻¹ año⁻¹, el sistema fue intensivo incluyendo altas dosis de abono animal (80 ton ha⁻¹ año⁻¹) alta densidad de población (160 mil plantas ha⁻¹) (Silva, 2012).



Sin embargo, la productividad promedio de pequeños sistemas es inferior, debido a la baja fertilización, menores densidades de plantación y ausencia de control de malezas. Los datos reportados por Silva, (2012) reflejan el potencial de rendimiento del nopal en zonas semiáridas. Una producción de 20 ton de MS ha⁻¹ año⁻¹ (Santos *et al.*, 2000) es suficiente para sostener 4-5 cabezas de ganado por año. En la misma región se necesitan 15 ha de pradera para sostener una sola unidad animal, lo que significa que la productividad del nopal es 60-75 veces más alta. Una pequeña área de nopal provee suficiente forraje para sostener el hato, al mismo tiempo que se reduce la presión sobre los recursos forrajeros naturales.

Sin embargo, la productividad de los sistemas de producción limitados puede ser mucho más baja. Farías *et al.*, (2005) reportaron una productividad de 1.5 ton de MS ha⁻¹ año⁻¹, en una plantación de nopal sin control de malezas. El nopal intercalado con otros cultivos frecuentemente disminuye su productividad. Farías *et al.*, (2000) reportaron una productividad del nopal de 2.2-3.4 ton MS ha⁻¹ año⁻¹ con 5000 plantas ha⁻¹ con sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) intercalado. En conclusión, la productividad varía con los insumos y los sistemas, el productor debe de considerar la disponibilidad de tierra y el costo de los insumos al decidir cuál es el sistema es mejor para una situación en particular.

CALIDAD DE FORRAJE

Nutrientes

Los cladodios de nopal son ricos en agua, azúcares, cenizas y vitaminas A y C, pero son deficientes en proteína cruda (PC) y fibra (Ben Salem *et al.*, 1996; Le Houerou 1996a; Batista *et al.*, 2003a, b). Los cladodios exhiben una alta tasa Ca-P y son altamente palatables (Tegegne, 2001); Nefzaoui y Ben Salem, 2001). Sin embargo, numerosos autores (e.g. Le Houerou 1996a; Azocar, 2001; Nefzaoui y Ben Salem, 2001; Tegegne, 2001) han demostrado que existe alta variabilidad en el valor nutricional de los cladodios de diferentes especies y variedades. El valor nutritivo también varía con la estación del año, las condiciones agronómicas y el paquete tecnológico adoptado (textura de suelo, lluvia, fertilización, control de maleza, etc.). según Le houerou, (1996a) los cladodios de 1 a 3 años son ricos en agua durante el invierno y primavera (85-90%) y menos en verano (75-85%) y cuanto más joven es el cladodio mayor es el contenido de agua. Los cladodios como forraje pueden resolver el problema de agua para beber del ganado, pero debe ponerse atención a su bajo contenido de materia orgánica en relación a la composición de la dieta. Para compensar por el bajo contenido de materia orgánica, el rumiante consume grandes cantidades de cladodios, lo cual puede causar diarrea. Por lo tanto es recomendable asociarlo con alimentos fibrosos, así como con suplemen-

tos apropiados, en particular aquellos ricos en nitrógeno.

Comparado con alimentos convencionales, los cladodios de nopal poseen altas contenido de cenizas (Sawyer *et al.*, 2001). Dependiendo de la especie y la variedad, el contenido de cenizas varía de 100 a 250 g kg⁻¹ de MS, pero frecuentemente excede de 200 g kg⁻¹ MS. El Ca - seguido por el K - es el mineral más abundante en los cladodios, pero la disponibilidad de Ca para la microflora del rumen y el animal hospedero es comprometido por la alta cantidad de oxalatos y la proporción extremadamente alta de Ca-P. Los cladodios de *Opuntia* de las variedades "Gigante" y de *Nopalea* "IPA-20" cultivados en el noreste de Brasil contienen 120-145 g⁻¹ MS de cenizas, 29-42 g kg⁻¹ de Ca, y 3-4 g kg⁻¹ de P (Batista *et al.*, 2003b). Los datos de los minerales traza son escasos, sin embargo, las concentraciones de hierro, cobre, y manganeso parecen estar dentro de los rangos recomendados para dietas de rumiantes (Abidi *et al.*, 2009b).

Está bien documentado que los cladodios de nopal son bajos en proteína cruda (PC). Bajo las condiciones de Túnez, los cladodios de *O. ficus indica* f. *inermis* contienen 30-50 g kg⁻¹ MS de PC. La mayor parte del nitrógeno total (NT) está en forma soluble (865 g kg⁻¹, Ben Salem *et al.*, 2002a). Entre más viejos son los cladodios más bajo es el contenido de PC. Por lo tanto, los suplementos con nitrógeno en dietas que contengan nopal son indispensables para asegurar la actividad microbiana del rumen y mejorar el rendimiento del ganado. La literatura sugiere un rango de opciones para resolver el problema del bajo contenido de N en los cladodios de nopal:

- la inclusión de suplementos nitrogenados (pasta de soya, urea, follaje de *Atriplex numularia* etc.) en las dietas que incluyen nopal es actualmente la opción ampliamente adoptada y se han observado respuestas alentadoras en ovejas. Los ejemplos se reportan en la **Tabla 4**.
- la provisión de fertilizantes químicos (amonio y superfosfato) que incrementan el contenido de PC de los cladodios de 45 a 105 g kg⁻¹ MS (Gonzalez, 1989).
- el mejoramiento genético incremento exitosamente el contenido de PC de los cladodios (Felker *et al.*, 2006). Los cladodios de clones selectos de nopal sin espinas (clon TAMUK accesión 1270) reportado por Peter Felker reveló un contenido más alto (100 g kg⁻¹ de MS) de lo normal (30-50 g kg⁻¹ de MS) de PC.
- La fermentación sólida es recomendada como una opción alternativa para el enriquecimiento de la proteína de los cladodios (Araujo *et al.*, 2005), aunque esta técnica es todavía experimental. El análisis de beneficio-costo es requerido antes de seleccionar cualquiera de las técnicas que deban de adoptar los productores.

Los cladodios de nopal son ricos en carbohidratos (aprox. 600 g kg⁻¹ MS) almidón (aprox. 75g kg⁻¹ MS y β-caroteno (aprox. 6.5 mg kg⁻¹ MS (Ayadi *et al.*, 2009).



TABLA 4 Consumo, digestibilidad *in vivo*, y tasa de crecimiento de diferentes especies animales recibiendo dietas que contienen nopal

País	Especie	Período (días)	Dieta (g Ms day ⁻¹) y composición	Consumo de agua (litros día ⁻¹)	TMS consumo (g W ^{-0.75} h)	DMO (%) ^h	DPC (%) ^h	DFDN (%) ^h	Peso vivo inicial (kg)	Tasa de crecimiento (g día ⁻¹)	Ref. ^a
Etiopia	Cordero	97	508 paja de teff+58 NSC	1.02	65.0	46	48	50	17.0	23	a1
	Cordero	97	273 paja de teff+58 NCS+246 nopal	0.42	62.6	54	41	48	17.0	53	a1
Etiopia	Cordero	90	685 heno	1.22	70.0	59	57	49	20.0	11	a2
	Cordero	90	404 heno+503 nopal	0.02	97.0	58	54	37	19.5	28	a2
	Cordero	90	218 heno+508 nopal	0.01	77.0	61	49	30	19.0	0.0	a2
Tunez	Cordero	70	435 paja de cebada+178 cebada +157 pasta soya	3.05	72.1	69	73	68	19.5	108	b1
	Cordero	70	262 paja de cebada+157 pasta soya+577 nopal	1.30	85.2	71	71	69	19.5	119	b1
Tunez	Cordero	84	715 heno avena+300 concentrado	3.88	65.0	64	59	59	32.5	46	b2
	Cordero	84	544 heno avena+295 nopal +67 concentrado	2.47	68.9	65	59	66	32.5	39	b2
	Kid	84	454 heno avena+300 concentrado	3.20	74.9	65	63	59	19.3	46	b2
	Kid	84	488 heno avena+346 nopal +67 concentrado	1.38	94.5	67	64	59	19.3	24	b2
Brasil	Cordero	35	400 heno tifton+280 maíz molido+176 pasta soya +114 salvado trigo+15 sal+15 cal	4.90	96.5	73	74	57	26.6	255	c1
	Cordero	35	400 heno tifton+280 nopal +176 pasta soya+114 salvado trigo ^{wb} +15 sal+15 cal	2.30	102.1	83	87	77	27.9	231	c1
Brasil	Venado	21	250 heno Cynodon+600 nopal	0.04	84.4	74	77	48	13.7		c2
	Venado	21	125 heno Cynodon+600 nopal +125 cascarilla de soya	0.06	79.1	75	78	51	31.7		c2
	Venado	21	0 heno Cynodon+600 nopal +250 cascarilla de soya	0.03	66.5	78	80	59	31.7		c2
Brasil	Torettes		395 caña de azúcar+93 maíz+479 salvado de trigo		103.6		70	45			c3
	Torettes		390 caña de azúcar+92 maíz+314 salvado de trigo +163 nopal		107.4		76	47			c3
	Torettes		385 caña de azúcar+91 maíz+156 salvado de trigo +320 nopal		111.8		77	40			c3
	Torettes		381 caña de azúcar+92 maíz+0 salvado de trigo +469 nopal		103.4		80	37			c3
India	Borrego	45	752 Cenchrus heno+191 concentrado		73.9		49	46	29.8		d
	Borrego	45	547 Cenchrus heno+243 nopal		61.2		31	45	31.7		d
	Borrego	45	672 Cenchrus heno+237 nopal +48 pasta cacahuete		74.4		54	45	31.8		d
Sud africa	Borrego castrado	63	660 alfalfa molida+300 harina maíz+40 melaza		90.6	73			33.9	118	e
	Borrego castrado	63	410 alfalfa molida+240 nopal seco+300 harina maíz+40 melaza+10 urea		89.2	76			33.9	116	e
	Borrego castrado	63	285 alfalfa molida+360 dried nopal +300 harina maíz+40 melaza+15 urea		88.3	78			33.9	96	e
Tunez	Cordero	60	482 nopal +190 paja	0.38	72.6	58	59	49	19.9	8	f
	Cordero	60	503 nopal +258 paja-urea	0.42	78.7	64	66	63	19.9	20	f
	Cordero	60	513 nopal +198 paja+121 atriplex	0.44	85.0	65	72	65	19.9	31	f
	Cordero	60	362 paja+393 concentrado	1.89	74.4	72	70	66	19.9	40	f

PS: pasta de soya; NSC: pasta de Noug (*Guizotia abyssinica*)

WB: salvado de trigo. Los valores de consumo de MS (g kg⁻¹ W^{0.75}) fueron adaptados del artículo correspondiente.

TMS: Materia seca total

CA: Consumo de agua. TC: tasa de crecimiento

^aValores de consumo de materia seca (g kg⁻¹ W^{0.75}); W=Peso vivo; fueron adaptados de los datos reportados en el artículo indicado.

Valores para *Atriplex nummularia*. Valores de consumo de materia seca (g kg⁻¹ W^{0.75}) fueron adaptados de los datos reportados en el artículo indicado.

TMS: Materia Seca Total; DMO: digestibilidad de la materia orgánica; DPC: digestibilidad de la proteína cruda. DFDN: digestibilidad total libre.

Referencias: a1; Gebremanian 10, (2006); a2: Tegegne *et al.*, (2007), b1: Ben Salem *et al.*, (2004), b2: Abidi *et al.*, (2009), c1: Costa *et al.*, (2012=, c2; Souzaet *al.*, (2009), c3; Monteiro *et al.*, (2014); d; Misra *et al.*, (2006), e; Einkamerer *et al.*, (2009), f; Ben Salem *et al.*, (2002b).

De acuerdo con Abidi *et al.*, (2009a), el contenido de mucilago es alto en los cladodios sin espinas (6-13 g kg⁻¹ en fresco; y 6-14 g kg⁻¹ MS en cladodios con espinas en material fresco). La concentración de mucilago incrementa al menos al doble en verano comparado con el invierno. El mucilago reduce la salivación de los rumiantes, evitando así la reducción rápida del pH del rumen. Este fenómeno fue confirmado por Ben Salem *et al.*, (1986) quienes reportaron valores de pH del rumen de 6.3-6.8 en borregos alimentados con dietas basadas en paja suplementados con niveles progresivos de cladodios de nopal sin espinas. Estos valores son similares al pH óptimo (6.5-7) recomendados para el crecimiento normal y la actividad de la microflora en el rumen. Otros alimentos ricos en carbohidratos solubles como las melazas, causan acidosis en los rumiantes, debido a que son contienen poco o nada de mucilagos. Como planta suculenta, los cladodios de nopal son bajos en fibra. En general la fibra de la pared celular o detergente neutral (FDN) varía entre 180 y 300 g kg⁻¹ MS, aunque los cladodios de nopales con espinas (*Opuntia imbricata*) contienen 400 g kg⁻¹MS de FDN. La lignocelulosa (fibra detergente ácido FDA) varía de 120-200 g kg⁻¹ MS) y la lignina (lignina ácido sulfúrico detergente ASD 15-40 g kg⁻¹ MS) son también bajas. Los carotenos, la acidez titulable y los carbohidratos incrementan durante el desarrollo, mientras que la proteína y la fibra disminuyen. Es necesario anotar que los cladodios son altos en ácido málico y que su contenido varía debido a la actividad del ciclo fotosintético MAC a lo largo del día. Varios autores (Lila *et al.*, 2004; Mohammed *et al.*, 2004; Newbold *et al.*, 2005) condujeron ensayos *in vitro* e *in vivo* que mostraron que el ácido málico reduce las emisiones de metano. Por lo tanto, es de esperarse que la integración del nopal a las dietas animales podrían reducir la metanogénesis, contribuyendo así a la reducción de la emisiones de gases de invernadero, sin embargo esta hipótesis todavía requiere validación científica.

Factores antinutricionales

Como muchas plantas, los cladodios de nopal contienen fitoquímicos sin valor detrimental aparente en el ganado. Negalesseet *et al.*, (2009) determinaron el contenido de algunos factores antinutricionales en cladodios jóvenes y maduros de nopal sin espinas (*O. ficus-indica*) cultivados en Etiopia y reportaron que su contenido total de taninos varía entre 21 y 42 g ácido tánico equivalente kg⁻¹ MS, respectivamente. Sin embargo, un contenido muy bajo de estos taninos (1g ácido tánico equivalente kg⁻¹ MS) en la misma especie de nopal pero cultivado en Túnez fue reportado por Ben Salem *et al.*, (2002a).

El contenido total de oxalatos varía entre 60 y 120 g kg⁻¹ MS. Abidi *et al.*, (2009b) reportaron que los cladodios de nopal espinoso son más altos en oxalatos (110-118

mg kg⁻¹ MS) que los nopales sin espinas (102-105 g kg⁻¹ MS) creciendo en una zona árida de Túnez. Es bueno que estos oxalatos sean insolubles, por lo que no tienen efecto tóxico. Sin embargo es conocido que los oxalatos insolubles forman complejos con Ca y Mg haciéndolos no disponibles a la microflora del rumen y al animal hospedero. De acuerdo con Ben Salem *et al.*, (2002a) y Abidi *et al.*, (2009) los cladodios de nopales espinosos y sin espinas son bajos en saponinas (2-5 g kg⁻¹ MS), fenoles totales (10-34 g kg⁻¹ MS), taninos totales (1g kg⁻¹ MS) y taninos condensados (<1g kg⁻¹ MS). Estos autores no indicaron la presencia de otros compuestos secundarios en los cladodios de nopal con efectos potencialmente negativos en el valor nutricional ni en el desarrollo y salud del animal.

Fermentación

Existen diferentes técnicas *in vitro* para evaluar el potencial de fermentación de los cladodios de diferentes especies y variedades de nopal.

La técnica de producción de gas desarrollada por Menke y Steinglass (1988) usando jeringas de vidrio calibradas ha sido ampliamente adoptada en laboratorios de investigación desde la década pasada. La digestión de materia orgánica conduce a la producción de ácidos grasos volátiles (AGV), amonio y diferentes gases, principalmente bióxido de carbono y metano. Por lo tanto, la técnica está basada en las siguientes hipótesis: entre más gas es producido en el sistema *in vitro*, el substrato es más digestible en el rumen. Se han desarrollado ecuaciones para predecir la digestibilidad y el contenido de energía de un amplio rango de alimentos animales. Batista *et al.*, (2003a), midieron la producción de gas de tres variedades de nopal cultivados en el Noreste de Brasil ("Gigante", "Miuda" e "IPA-20"). Estos autores reportaron altos volúmenes de producción de gas después de la fermentación por 24 horas de estos cultivares. "Gigante" presentó los más altos valores (210 ml g⁻¹ MS), seguido de "Miuda" (202 ml g⁻¹ MS) e "IPA-20" (195 ml g⁻¹ MS). En el sur de Túnez, se reportaron valores más altos de potencial de producción de gas (Abidi *et al.*, 2009b) en nopal sin espinas (*Opuntia ficus-indica* f. *inermis*) y espinoso (*Opuntia amychlaea*) cosechados en el invierno (138 y 140 ml g⁻¹ materia orgánica (MO), respectivamente) y en el verano (140 y 145 g⁻¹ OM, respectivamente). Una alta producción de gas durante las primeras horas de la incubación es característica de los alimentos ricos en carbohidratos, incluido el nopal.

Abidi *et al.*, (2009b) usaron fermentadores de flujo simple continuo para comparar las características de la fermentación de dietas experimentales compuestas de cladodios de nopal con espinas y sin espinas (17g), follaje de *Atriplex nummularia* (12g) y paja de trigo (24g). Ambas dietas (nopal sin espinas/espinoso) exhibieron



un pH similar, AGV totales, flujo total de N, bacterias del efluente de y bacterias asociadas al líquido y sólido aisladas de los contenidos del fermentador. Sin embargo la dieta que contenía nopal espinoso mostro una proporción mas alta de acetato a propionato ($P=0.016$) y más bajo flujo de amonio ($P=0.007$).

La técnica de producción de gas fue adoptada por Nagesse *et al.*, (2009) para determinar los parámetros de fermentación y estimar la energía metabolizable (EM) de algunos forrajes no convencionales, incluyendo cladodios maduros (CM) y jóvenes (CJ) de nopal sin espinas creciendo en Etiopia. El contenido ideal de E es de 10-13.6 MJ kg⁻¹ MS,, pero los CM y CJ revelaron una EM de 7.5 y 8.5 MJ kg⁻¹ MS, respectivamente, y no fueron consideradas buenas fuentes de energía.

Consumo



Existe considerable información acerca de la respuesta de diferentes especies animales a las dietas que contienen nopal. Los ensayos de alimentación usualmente evalúan cladodios de nopal sin espinas (referidos en adelante como nopal) como una fuente de forraje alternativo para ganado lechero y otros rumiantes. La **Tabla 4** presenta información generada de algunos estudios. Mientras más nopal fresco se consuma, el ganado consume menos agua. La reducción del consumo de agua por varias razas de ovinos y otras especies animales (venados, cabritos y becerros) varía de 40-98%, dependiendo de la proporción de nopal en la dieta. Gebremariam *et al.*, (2006) reportaron una reducción del 59% en el consumo de agua de borregos recibiendo una dieta compuesta por 43% de nopal fresco. Asimismo, en un estudio conducido en Etiopia, los corderos dejaron de beber agua cuando se les permitió el acceso a la dieta conteniendo 55% de nopal fresco (Tegegne, *et al.*, 2007). Las huertas de nopal en consecuencia son una opción promisoría para aliviar la escasez de agua de zonas áridas durante los periodos de sequía.

El nopal es frecuentemente usado como suplemento forrajero de baja calidad, incluyendo paja y pastura de hierba. Su impacto en el consumo de la dieta es mejorado cuando se asocia con una fuente de proteína. El consumo total de MS (TMS) de borregos recibiendo pastura henificada y nopal fue 26% más alto que los borregos que recibieron solo pastura henificada (Tegegne *et al.*, 2007). El reemplazo de fuentes de energía, tales como grano de cebada (Abidi *et al.*, 2009 a) o maíz molido (Costa *et al.*, 2012), por nopal en dietas de borregos incremento el consumo de TMS en 6% y 25% respectivamente. El reemplazo de la cebada por nopal incremento el TMS en 26% de cabras en crecimiento (Abidi *et al.*, 2009a).

Digestibilidad

Las dietas ricas en carbohidratos como la melaza y el nopal mejoran la palatabilidad y la fermentación en el rumen, lo que usualmente conduce a un incremento del TMS y/o digestibilidad de la dieta. Dependiendo de la composición de la dieta, la inclusión de nopal resulta en incremento de la digestibilidad de la materia orgánica (MO) no tiene efecto en este parámetro. Los estudios conducidos en Etiopia (Gebremariam *et al.*, 2006; Tegegne *et al.*, 2007), Túnez (Ben Salem *et al.*, 2004; Abidi *et al.*, 2009 a) y Brasil (Costa *et al.*, 2012) mostraron un incremento de la digestibilidad de la MO de la dieta por 2 a 10 puntos porcentuales en corderos consumiendo nopal y cabritos comparados con las dietas sin nopal. Esto podría estar asociado al mejoramiento de la fermentación del rumen. La inclusión de nopal en dietas de corderos etíopes alimentados con paja de teff o paja henificada resulto en una disminución de la digestibilidad proteína cruda aparente de la dieta. Gebremariam *et al.*, (2006) señalaron que la reducción en la digestibilidad aparente de la proteína cruda de la dieta a niveles crecientes de nopal en la dieta podría explicarse por el contenido de taninos totales del nopal. De hecho, los taninos tienen gran afinidad con proteínas, haciéndolos no disponibles para la microflora del rumen y el animal hospedero. Los autores no encontraron otros estudios relacionados que muestren el efecto de los taninos del nopal en la digestión ruminal de rumiantes; la interacción entre los taninos de los cactus y las proteínas no ha sido investigada *In vivo* e *In vitro*. En las condiciones de Brasil, Costa *et al.*, (2012) notaron un incremento del 13% en la digestibilidad de la PC en dietas de corderos. También en Brasil, Souza *et al.*, (2009) reportaron altos valores de digestibilidad de la PC (77-80%) en machos recibiendo pasto *Cynodon* henificado, nopal y cascarilla de soya. Ben Salem *et al.*, (2002), Gebremariam *et al.*, 2006) y Misra *et al.*, observaron que no hubo efecto sobre la digestibilidad de la fibra (FDN) en la dieta. Costa *et al.*, (2012) reportaron un efecto positivo del nopal en la FDN digestibilidad - aumento del 20% en digestibilidad FDN en dietas que contenían nopal, comparadas con la dieta control (sin nopal) provista a corderos. En resumen, el suministro de nopal no tiene efecto negativo en la digestibilidad de la dieta, sino que puede incluso mejorarla.

UTILIZACION

Los cladodios de nopal y los residuos de frutas son un alimento efectivo desde el punto de vista de costos para animales rumiantes. Los beneficios de usar nopal como alimento están bien documentados (Nefzaoui y Ben Salem., (2001); y Ben Salem y Abidi, 2009).

Las plantaciones de nopal forrajero para corte (co-

sechado) como forraje (consumido directamente por el ganado o los animales silvestres) ha sido desarrollado en Sicilia y África del Norte desde mediados del S. XIX. Los productores deseaban la estabilización del recurso forrajero en zonas áridas y semiáridas en verano y otoño es un factor casi-permanente que limita la producción pecuaria (Le Houerou, 2002). Estas plantaciones son todavía usadas como,

- parte de la dieta diaria común;
- alimento suplementario en verano y otoño; y
- alimento de reserva durante los periodos de sequía que pueden durar de 1-3 años.

En contraste con otros forrajes y cultivos forrajeros los cuales necesitan ser almacenados (heno o ensilado), el nopal es un cultivo siempreverde y puede ser usado todo el año. El modo natural y probablemente el más eficiente de usar el nopal es cortar los cladodios y suministrarlos sin ningún proceso. Asimismo, los nopales son ricos en agua y juegan un papel crucial en ambientes semiáridos como reemplazo de agua. El ensilado o deshidratado son factibles, pero significan costos adicionales en términos de manejo, energía y trabajo.

Los diferentes usos son descritos enseguida, enfocados en consumo directo, corte y transporte, ensilado y finalmente, bloques alimenticios y su potencial del uso de los frutos de baja calidad.

Consumo directo

El consumo directo sobre las plantas ocurre principalmente en las nopaleras nativas sobre plantas espinosas y sin espinas. Es regularmente utilizado en unos cuantos países, principalmente México, donde todavía existen poblaciones silvestres de nopal que son consumidas directamente por el ganado. En Etiopia y Eritrea existen poblaciones invasivas de nopal (región del Tigray) el nopal también es consumido por los camellos y el ganado vacuno, que consumen intensivamente el nopal espinoso (**Figuras 6 y 7**). En plantaciones formales el consumo directo no es recomendable debido a que dañan rápidamente las plantas. La forma más eficiente y de bajo costo es la pastorear el nopal es controlar el consumo con un cerco eléctrico, esperando a que se consuma completamente la biomasa de una hilera para permitir el acceso a la siguiente, el mayor daño a las plantas del consumo directo es el desperdicio debido al consumo parcial de cladodios, lo cual debe de ser evitado (Le Houerou, 2002).

Las espinas de los nopales silvestres pueden ser quemadas directamente antes del pastoreo, lo cual es practicado en Texas. Maltsberger (1991) condujo una extensa investigación sobre la economía de la quema de espinas usando gas propano y sobre el suministro de cladodios chamuscados al ganado, encontrando que se requieren

15 L de propano para 14 vacas por día, así como 8 h de trabajo para preparar el alimento de 200 animales por día. Pluenekke, (1990) mostro que la mano de obra y los costos del combustible necesarios para quemar las espinas son disminuidos significativamente si se usa en plantaciones en surcos. Aun así, existe algún desperdicio debido al pisoteo del ganado de porciones de cladodios, por lo que es preferida la técnica de corte y acarreo.

Técnica de corte y acarreo

Esta opción es la más comúnmente usada para la utilización de nopal forrajero. Previene el desperdicio y el consumo excesivo. Se puede cosechar de los dos tipos de nopal, con y sin espinas que son colectados y transportados al establo, picados y mezclados con otros alimentos y suministrados a los comederos. Las espinas deben de ser quemadas antes del troceado de lo cladodios. Existen diferentes modelos de picadoras de nopal en el mercado, desde pequeñas maquinas manuales hasta picadoras eléctricas sofisticadas. En África del Norte el troceado se realiza manualmente con cuchillos, haciéndola una tarea familiar, especialmente las mujeres y niños (**Figura 8**). En Túnez y Etiopia se fabrican picadoras de bajo costo que son propulsadas por fuerza humana (**Figuras 9 y 10**). En México y Brasil se utilizan picadoras motorizadas más sofisticadas (**Figura 11**). Estas máquinas además de reducir el desperdicio, los cladodios troceados son más convenientes al momento de incorporarlos a las dietas mezcladas.

Secado

Bajo ciertas circunstancias, los cladodios pueden ser fraccionados en rebanadas delgadas y secados con aire, por ejemplo, cuando el periodo de cosecha es corto (poda de nopal en huertas de tuna) o cuando el objetivo es producir un alimento comercial o si los cladodios serán mezclados con otros ingredientes. En todos los casos, se recomienda el secado al sol para evitar el uso de combustibles caros que incrementen los costos de producción. Una vez secos los cladodios pueden molerse para producir harina de nopal - evitando la molienda fina que podría transitar muy rápidamente en el tracto digestivo.- Algunas veces, los cladodios son secados para reducir el alto contenido de agua (85-90%), basados en que el consumo de cladodios frescos conduce a la producción de heces muy liquidas. Los hallazgos de De Waal *et al.*, (2013), niegan esta suposición y muestran que aun animales alimentados con cladodios secos, producen heces muy húmedas debido a la presencia de mucilago.

El secado de nopal es practicado principalmente en Brasil y Sudáfrica. Varios estudios (Zeeman, 2005; Einkamerer, 2008; Menezes, 2008), confirman que el nopal (*Opuntia*) secado al sol y molido grueso puede



Figura 6

Camellos consumiendo nopal espinoso en Etiopía

**Figura 7**

Ganado de lidia consumiendo nopal en San Luis Potosí, México (Foto: Ali Nefzaoui)

**Figura 8**

Troceado manual de nopal sin espinas en Túnez (Foto: Ali Nefzaoui)

**Figura 9**

Picadora manual de nopal en Túnez

**Figura 10**

Picadora manual de nopal en Etiopía (Foto: Ali Nefzaoui)

**Figura 11**

Maquinas procesadoras de nopal en Brasil



reemplazar una gran proporción de la alfalfa henificada en la dieta de corderos Dorper. De Waal *et al.*, (2013) investigó el potencial comercial de cladodios (*Opuntia ficus-indica*) secados al sol para dietas de engorda de corderos Dorper castrados (**Tabla 5**). Los autores demostraron que no había diferencia significativa en las características de la canal, sugiriendo que la calidad de la canal no fue afectada por la inclusión de nopal secado al sol y molido grueso en las dietas o por el tipo de fuente de nitrógeno. Por otro lado, la diferencia en ganancia diaria promedio entre las dietas

basadas en nopal muestra la importancia de las fuentes de nitrógeno de alta calidad para corderos. Estos resultados indican buenos prospectos para la comercialización de cladodios secos en dietas balanceadas para rumiantes.

Da Silva *et al.*, (2010) investigaron dos formas de proceso: picado con machete (PM) y picado con maquina rebanadora, y dos estrategias de alimentación; concentrado separado (CS) y mezcla total en la ración (MTR). Monitorearon el comportamiento de la alimentación de vacas lecheras

TABLA 5 Composición de las dietas (T=, T1 y T2) ofrecidas a corderos Dorper jóvenes castrados (adaptado de Waal *et al.*, 2013a)

Ingredientes (kg material secado al aire)	Dieta ^a	(g kg ⁻¹)	
	T0	T1	T2
Cladodios de <i>Opuntia</i> secados al aire molido grueso	–	330	300
Heno de alfalfa molida gruesa	577	255	190
Harina de maíz amarillo	358	340	275
Urea grado alimenticio	10	20	–
Pasta de girasol	–	–	180
Melazas (Enermol)	40	40	40
Cal grado alimenticio	15	15	15
Ganancia diaria (GDP) en peso (g)	181a	125b	181 ^a
Costo de la dieta por cabeza ⁻¹ día ⁻¹ (N\$)	3.71a	2.73b	3.26b

^a T0: dieta tradicional de engorda, T1 y T2: dietas basadas en *Opuntia* sin fuentes de nitrógeno (T1=nitrógeno no proteico; t2=proteína natural).

Medias seguidas de la misma literal (a/b) dentro de la misma línea no difieren (P>0.05) prueba de Tukey

N\$ = Dólar de Namibia (1 N\$=0.072 USA \$).

y concluyeron el nopal procesado por la maquina es recomendable para maximizar la ingesta de materia seca y evitar alteraciones en la composición de la leche. La estrategia de alimentación MTR es recomendada para reducir la selectividad en las vacas, la cual conduce a un desbalance entre la dieta ofrecida y la consumida.

Ensilado

Bajo ciertas circunstancias, puede ser necesario elaborar silo de cladodios de nopal; cuando la producción de cladodios está concentrada en una época (poda de huertas) o cuando los subproductos agroindustriales húmedos no pueden ser almacenados por largo tiempo y deben de ser aprovechados. Para elaborar ensilado de alta calidad, es necesario buena fermentación láctica, lo que requiere niveles adecuados de humedad (30-40%) y azúcar en un ambiente completamente anaeróbico. Los cladodios de nopal contienen suficientes carbohidratos para una buena fermentación láctica, pero su alto contenido de agua obliga a mezclarlos cuidadosamente con otros materiales como paja o cascarillas.

Abidi *et al.*, (2013) condujeron un experimento en Túnez donde la industria del olivo está bien desarrollada. Probaron el potencial del ensilado de una mezcla de cladodios troceados (350 kg), pasta de aceitunas (subproducto de las prensas de aceite de olivo; 400 kg), y salvado de trigo (250 kg). La mezcla fue ensilada por 75 días y luego distribuida con suplemento concentrado (75% de grano de cebada y 25% de pasta de soya) para corderos. Se compararon tres dietas:

- Dieta 1 (testigo: heno de avena ad libitum y 400 g de alimento concentrado)
- Dieta 2 (ensilado y 400 g de alimento concentrado)

- Dieta 3 (50% de la dieta 1 y ensilado).

Las cantidades de energía distribuida fueron ajustadas por dietas iso-energeticas e iso-nitrogenadas. El ensilado obtenido fue de buena calidad con un pH de 4.5. el promedio de ganancia diaria de peso de los corderos y la calidad de la carne fueron similares en las tres dietas.

Bloques alimenticios

En muchos países, y en Túnez en particular, se descartan grandes cantidades de fruta debido a su baja calidad o a los costos de mano de obra. Los frutos sobremaduros de tuna atraen las moscas de la fruta o mosca del Mediterráneo (“Med fly”) insecto que puede causar daños extensivos en un gran número de cultivos frutales. Por lo tanto, se insiste a los productores que colecten esos frutos y los incorporen en bloques alimenticios para el ganado. Se han desarrollado diferentes fórmulas basadas en el reemplazo de las melazas por tunas. Chermiti (1998) investigo el potencial de la tuna como ingrediente de los bloques alimenticios y evaluó el consumo voluntario de toretes y borregas que recibieron una dieta basada en heno de avena/ebo suplementada con dos clases de bloques alimenticios (uno conteniendo tunas y el otro melazas). Concluyo que el consumo voluntario de ambas especies animales fue idéntico en ambos tipos de bloque alimenticio. Ben Salem *et al.*, (2003) mezclaron frutas de nopal procesadas (90 g kg⁻¹ MS), con pasta de aceituna (367 g kg⁻¹ MS), salvado de trigo (243 g kg⁻¹ MS), cal viva 154 g kg⁻¹ MS), urea (73 g kg⁻¹ MS) y sal (73 g kg⁻¹ MS) para preparar bloques alimenticios. Los autores ofrecieron los bloques con follaje de encino (*Quercus coccifera*, una especie arbustiva que contiene taninos) para mejorar el valor nutritivo (ingesta total, materia orgánica y digestibilidad de la



fibra de la dieta, y retención de nitrógeno) de la dieta para cabras. La administración de pequeñas cantidades de polietilenglicol en los bloques alimenticios resultó en una mejora significativa de los parámetros, como resultado de la desactivación de los taninos del encino con el reagente.

CRECIMIENTO ANIMAL Y CALIDAD DEL PRODUCTO

En numerosos artículos se ha concluido que la suplementación de forraje de baja calidad con cladodios frescos de nopal incrementa la ganancia diaria de peso (GDP) de rumiantes en crecimiento. La respuesta es aún mayor cuando se provee una fuente de nitrógeno (**Tabla 5**). La sustitución de hasta el 50% de la paja de teff con nopal incremento la ADG de corderos etíopes de 23 a 53 g día⁻¹ (Gebremariam *et al.*, 2006). Bajo las condiciones de Túnez, la sustitución de grano de cebada por nopal incremento la ADG de corderos Barbarinos de 108 a 119 g día⁻¹ (Ben Salem *et al.*, 2004). Debe de mencionarse que en ambos estudios las dietas basadas en nopal incluyeron suplementos proteicos (pasta de noug - *Guizotia abyssinica* - y pasta de soya, respectivamente). Cualquier decremento ligero en la tasa de crecimiento de los corderos con la dieta conteniendo nopal fue considerado tolerable, tomando en cuenta los bajos costos de producción para los pequeños productores y considerando además de que el nopal está disponible todo el año (Einkamer *et al.*, 2009; Costa *et al.*, 2012). Aunque la mezcla de nopal con pasta de soya produjo un ADG en corderos Barbarinos de 119 g día⁻¹. Ben Salem *et al.*, (2004) favorece una dieta de ingredientes disponibles localmente (i.e. paja de cereales, nopal y follaje de *Atriplex nummularia*) por dos razones; 1) es menos cara que una dieta conteniendo grano de cebada y pasta de soya y 2) los arbustos tienen beneficios adicionales (e.g. estabilización del suelo y producción de fruta).

En resumen, el nopal puede mejorar el valor nutritivo de las dietas de calidad pobre (e.g. dietas basadas en pajas) debido a su alto contenido de carbohidratos solubles. También puede incrementar la ganancia de peso de pequeños rumiantes y toretes alimentados con residuos de cultivos y pasturas de baja calidad, asumiendo que se provee una pequeña cantidad de una fuente de nitrógeno a la dieta.

La mayoría de los estudios sobre los efectos del consumo de nopal sobre la producción y calidad de leche han sido realizados en Brasil. El nopal es muy valorado en épocas de sequía y escasez de agua. Los nopales espinosos son provistos al ganado en el Norte de México y el sureste de EUA (Maltsberger, 1991). Es una fuente barata de forraje para el ganado y es frecuentemente

usado por los ganaderos y lecheros de esas áreas. Los nopales espinosos son tradicionalmente incluidos en dietas de rumiantes, quemando sus espinas directo en las plantas con quemadores de gas propano. Dado que los nopales sin espinas se han diseminado ampliamente en las últimas décadas, más productores lo usan ahora en la alimentación de vacas lecheras. Según los ganaderos del noreste de Brasil, las vacas Holstein alimentadas con dietas mixtas conteniendo 6% de nopal fresco picado, 20% de un forraje fibroso (heno o paja) y 20% de un concentrado rico en proteína, produce alrededor de 20 litros al día⁻¹ de leche (Ben Salem, observación personal). Oliveira *et al.*, (2007) estudiaron el valor de reemplazo del nopal (0, 12, 25, 38 y 51%) por maíz quebrado y heno de pasto *Cynodon* en vacas lecheras criadas en el Norte de Brasil. Basados en sus resultados, el nopal puede reemplazar totalmente el maíz quebrado y parcialmente el heno (alrededor del 40%) sin un efecto significativo en la producción de leche (20.3-21.8 kg día⁻¹).

Muchos experimentos en el noreste de Brasil han mostrado que la pasta de cladodios secos puede reemplazar el maíz en la alimentación de corderos (Veras *et al.*, 2002). En una prueba de cuatro niveles de reemplazo del maíz (0, 25, 50, y 75%) los resultados mostraron que no hubo efecto de los niveles de reemplazo en la digestibilidad de la materia seca, la materia orgánica o la fibra. Veras *et al.*, (2005) también probaron el efecto de los niveles de reemplazo (0, 33, 67 y 100%) en el crecimiento de corderos estabulados; encontrando que la ganancia de peso corporal y la tasa alimento-ganancia decrecieron mientras que la ingesta de FDN y ADF incrementaron linealmente el reemplazo de maíz. El consumo de materia seca, proteína cruda, materia orgánica y carbohidratos totales y el rendimiento de la canal no fueron afectados por el reemplazo del maíz con harina de nopal forrajero.

Calidad del producto

Tomando en consideración las preferencias de consumidor y la salud humana, algunas referencias mencionan el efecto el suministro de nopal en la calidad de la carne. Abidi *et al.*, (2009) concluye que el reemplazo de cebada por nopal como fuente de energía en la dieta de cabritos y corderos Barbarine no produjo mayores cambios en la composición de la grasa intramuscular de la carne. Sin embargo, se encontró que el contenido de ácido vaccénico fue más alto en la dieta de que contenía nopal. Este ácido graso - como la mayoría de los ácidos grasos conjugados- tiene impacto positivo en el sistema cardiovascular. En este caso se usó como forraje tosco (heno de avena) usado como dieta basal. Atti *et al.*, (2006) analizaron la calidad de la carne de cabritos





Figura 12
Vacas lecheras del Estado de Pernambuco, Brasil, alimentadas con nopal mezclado con ensilado y alimento concentrado (Foto: Djalma Santos).

alimentados con nopal en dietas basadas en concentrados suplementadas con una pequeña cantidad de heno de avena. Estos autores reportan que la ingestión de nopal resultó en un incremento en la proporciones de ácido linoleico, linolenico y ácido linoleico conjugado. También obtuvieron una proporción más alta de ácidos grasos polinsaturados (AGP) y una proporción AGP a ácidos grasos saturados (AGS) más alta. Los dos estudios confirman que cuando se incluye nopal en las dietas de ovejas y cabras se mejora la calidad de la carne de acuerdo a la preferencia del consumidor; mas AGP y menos AGS. Bajo las condiciones del noreste de Brasil, Santos et al., (2011) evaluaron la muscularidad y adiposidad de las canales de corderos Santa Inés que recibieron nopal como reemplazo de maíz molido; no hubo efecto en el rendimiento en canal caliente, rendimiento biológico (proporción del peso de canal caliente a peso de canal vacío), ni en la proporción de grasa requerida para asegurar la preservación de la canal.

Olivera et al., (2007) concluyeron que la alimentación con nopal no afectó la producción de leche de vacas lecheras que recibieron niveles crecientes de nopal. Sin embargo, sí cambió significativamente la composición de la leche, en particular el perfil de ácidos grasos. De hecho, el suministro de nopal redujo las proporciones de ácidos esteárico y oleico, pero no afectó los otros ácidos grasos de cadena larga, tales como los ácidos linoleico (C18:2) y linolenico (C18:3).

PERSPECTIVAS Y NECESIDADES DE INVESTIGACION

El calentamiento global, el cambio climático y el aumento de la población humana y animal requieren del uso más eficiente de los sistemas de zonas secas. Se requieren cultivos perennes con mayor productividad por unidad de área para proteger los pastizales naturales de la degradación. El nopal encaja bien en este escenario, con una productividad 60-75 veces mayor que los pastizales naturales. El cultivo intensivo en áreas pequeñas aliviaría la presión sobre los recursos naturales de los pastizales, reduciendo su degradación. Al mismo tiempo más productos (e.g. carne y leche) producidos por animales alimentados con nopal pueden aliviar el hambre, incrementando la seguridad alimentaria y la resiliencia de las poblaciones viviendo en las zonas áridas. Existen numerosas historias de éxito de varios países y tecnologías disponibles para ayudar a otras regiones con ambiente similar. Los tomadores de decisiones, deben de estar conscientes de los beneficios del nopal como forraje, así como de sus beneficios ambientales; estableciendo políticas para incrementar la superficie plantada. La investigación y el desarrollo son necesarios en esta área, así como más apoyo de donantes, funcionarios y managers de la ciencia, quienes pueden conseguir que se cultive más nopal en zonas secas. Esto es también vital para incrementar la colaboración entre equipos de investigación internacionales.

La información actualmente disponible sobre la producción de nopal forrajero es adecuada para implementar sistemas exitosos en diferentes zonas. Se requiere más investigación para incrementar el conocimiento de biotecnología, interacción genotipo x ambiente, sobre los sistemas de alimentación localmente adaptados utilizando nopal e ingredientes locales, y mejorar la eficiencia de uso del nopal en los diferentes sistemas de producción pecuaria. Es necesario

proceder con precaución para evitar la introducción de especies invasivas. El uso de nopal sin espinas para producción de forraje debe de impulsarse. Las plagas y enfermedades son también un problema en zonas localizadas; es necesario generar y promover variedades tolerantes a enfermedades para solucionar el problema. Por lo tanto, la conservación de los recursos genéticos y la promoción de la cooperación multilateral son esenciales para enfrentar estos retos.



Producción y utilización del nopal como hortaliza o *Nopalitos*

Candelario Mondragón Jacobo^a y Santiago de Jesús Méndez Gallegos^b

^a Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro. México

^b Campus San Luis Potosí. Colegio de Postgraduados. San Luis Potosí. México



Producción y utilización del nopal como hortaliza o *Nopalitos*

INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes retos de los países subdesarrollados y en desarrollo es como conseguir la seguridad alimentaria sin comprometer su base de recursos naturales, bajo la amenaza continua del crecimiento de la población y la tendencia global del cambio climático. El crecimiento poblacional ejerce una presión directa sobre los recursos tierra y agua, representando una competencia por fuentes de agua limpia y tierras de primera calidad, recursos que son continuamente removidos de la producción agrícola para dedicarlos a satisfacer las necesidades del desarrollo urbano e industrial. Como resultado, existe menos agua y tierras disponibles para la producción agrícola, llevando al dilema de convertir más tierras de pastizal y bosques hacia uso agrícola o coartar el desarrollo. La búsqueda de cultivos alternativos y tecnologías agrícolas más eficientes parece ser la opción más razonable.

Cultivos que posean mecanismos que les confieren mayor eficiencia de uso del agua, capacidad de crecer en suelos limitantes y tolerancia a frío o calor han sido el sueño de la ciencia agrícola desde la segunda mitad del siglo pasado, cuando los efectos del crecimiento de la población y las deficientes políticas de planeación de uso de los recursos e hicieron más evidentes. El nopal (*Opuntia* spp.) una planta nativa de las zonas semiáridas de altiplanicie central de México introducida inicialmente al resto del mundo como una curiosidad desde el S. XVI, ha recibido atención especial por los gobiernos, organismos no gubernamentales y productores. Ha sido mencionada repetidamente como una alternativa seria para la utilización de regiones semiáridas afectadas por la desertificación natural e inducida en las zonas semiáridas subtropicales y tropicales del mundo.

El nopal es más conocido como un cultivo frutal, y como tal ha adquirido status de cultivo formal en las estadísticas mundiales. Los datos estiman que está presente a escala comercial en más de 20 países, cubriendo una superficie de aproximadamente 150 000 hectáreas (estimación de los autores). El cultivo y utilización del nopal como forraje seguramente seguirá una tendencia similar, dado que el consumo de proteína de origen animal continua creciendo. Adicionalmente la adopción del cultivo del nopal como forraje es más fácil, ya sea en la producción comercial estabulada o en sistemas pastorales, en ambos casos el nopal puede aliviar el deterioro de los pastizales naturales.

El consumo de los cladodios tiernos, conocidos en México como *nopalitos*, es una costumbre - al mismo tiempo que su cultivo -, que se originó y evolucionó en la región central de México. El consumo está profundamente enraizado en la cultura gastronómica del país, favorecido por la facilidad de su cultivo y su alta productividad. La tendencia es hacia el incremento, impulsada por los descubrimientos recientes de sus propiedades funcionales (discutidos en otro capítulo de este libro). Los nopalitos representan un ejemplo único de sabiduría hortícola de los antiguos Mexicanos, la utilización de las partes vegetativas, induciendo su renovación por la cosecha continua, los productores explotaron los efectos fisiológicos de la poda, asegurando así la disponibilidad de una hortaliza verde durante todo el año, en una región dominada por el ciclo bimodal de precipitación pluvial, marcado por un periodo seco y otro húmedo.

La introducción de los nopalitos a otros países y culturas no ha sido fácil, a pesar de la adaptabilidad y alta productividad de la planta en la mayoría de los sitios que se ha probado. La presencia de espinas -que poseen aun los genotipos "sin espinas"- en los cladodios jóvenes, la abundancia de mucilago, y la falta de atractivo organoléptico de los nopalitos cocinados han limitado su adopción. Actualmente existen pequeñas plantaciones de nopalitos en los EUA, principalmente en California, Texas y Arizona, que producen pequeños volúmenes dedicados a los mercados de productores, y consumidos principalmente por inmigrantes de origen hispano.

Este capítulo describe brevemente la domesticación del nopal de verdura y presenta los sistemas de producción actuales - desde la recolecta a la producción en invernaderos - así como las técnicas básicas de preparación.

INICIOS DE LA UTILIZACION Y DOMESTICACION

En las etapas tempranas de la utilización del nopal, el órgano de interés fue el fruto, de hecho el consumo de frutos maduros por los antiguos mexicanos ha sido documentado a través del estudio de coprolitos encontrados en cuevas, demostrando que estos frutos formaban parte de la dieta de varias tribus (Hoffman, 1995). En contraste no existen registros del consumo de nopalitos, debido a su perecibilidad no se han encon-

trado residuos en los sitios arqueológicos estudiados. Puede especularse, que los antiguos mesoamericanos que seguían las rutas de recolecta de tunas de las nopaleras silvestres, pudieron verse obligados al consumo de brotes tiernos para saciar la sed, reconociendo a los cladodios tiernos como una fuente ocasional de agua. También pudieron ser usados como alimento de emergencia en tiempos de escasez de fruta -situación muy frecuente en el clima semiárido predominante en la altiplanicie mexicana, probablemente exacerbada por la tendencia de producción alternada de la planta. La eliminación de las espinas fue realizada probablemente asando en el fuego los cladodios, lo cual es necesario para facilitar su consumo.

Posteriormente, una etapa importante del proceso de domesticación fue la identificación de plantas sin espinas, un carácter mutante que limita la sobrevivencia de la planta en el ambiente natural (Colunga García *et al.*, 1986). Todos los cladodios jóvenes independientemente de la especie o variedad, presentan espinas y gloquidas. Únicamente los cladodios maduros pueden ser sin espinas, permitiendo una fácil manipulación. Las variedades modernas de nopalitos son todas sin espinas y fueron originalmente obtenidas de los huertos de traspatio.

Las nuevas demandas de los mercados modernos, menos dependientes de la producción local y la disponibilidad estacional, han promovido el interés por la producción fuera de temporada (idealmente todo el año). Por lo tanto las zonas productoras se han expandido a áreas con invierno moderado o con clima francamente subtropical, y recientemente a la adopción de varias formas de invernaderos. Dado su status original de cultivo emergente, adecuado para productores de recursos limitados en sitios de baja productividad, la producción de nopalitos en invernadero ha evolucionado gradualmente de invernaderos a básicos a más sofisticados. Los tres tipos principales de invernadero en uso en la altiplanicie mexicana y el norte del país se describirán en este capítulo.

VARIETADES DE NOPAL DE VERDURA

En contraste con el amplio número de variedades de nopal tunero, las variedades comerciales para producir nopalito están limitadas a “Milpa Alta”, “Atlixco”, y “COPENA V1”, las cuales se describen a continuación.

‘Milpa Alta’ *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.

Es un cultivar, originado y domesticado en México, en el Estado de Hidalgo (Reyes Agüero, *et al.*, 2004). El nombre comercial “Milpa Alta” se refiere a la región del mismo nombre ubicada al sureste de la Ciudad de México, lugar donde se inició la producción intensiva de

nopalitos. Se ha dispersado por todo México, cubriendo una superficie estimada en 7 500 ha. Sus cladodios de color verde brillante, tiernos, delgados, planos y fáciles de pelar son muy apreciados por comerciantes y consumidores. Es plantada en huertas a campo abierto o bajo cubierta plástica, en condiciones de temporal o de riego en zonas más secas. La planta es robusta, erecta, con cladodios oblongos, altamente productivos pero sensible a las heladas, la fruta es de tamaño intermedio, con cascara y pulpa de color amarillo-naranja, no muy jugosa, con semillas de tamaño mediano. Bien adaptada a el clima semiárido subtropical y al subtropical de tierras bajas (Gallegos y Mondragón, 2011). Esta variedad es similar a los nopales sin espinas con frutos de color amarillo-naranja presentes en otras partes del mundo: Italia, Marruecos, Túnez y Sudáfrica (**Figura 1**).

‘Atlixco’ *O. ficus-indica* (L.) Mill.

Esta variedad se originó en la altiplano central de México, pero fue nombrada “Atlixco” debido a que en este poblado comenzó su cultivo. Se estima que actualmente existen alrededor de 800 ha plantadas con ella, principalmente en los estados circunvecinos la Ciudad de México. la planta es vigorosa, erecta, con cladodios rómbicos-ovalados, sin espinas, de intenso color verde y calidad excepcional. Los nopalitos son tiernos, fáciles de pelar de forma ovoide y más gruesos que los de la variedad “Milpa Alta”. La fruta es grande (≤ 180 g), de cascara anaranjada y pulpa amarilla: su calidad es aceptable pero inferior a las tunas de variedades comerciales estándares. Los cladodios maduros son bien aceptados como forraje. Es muy productiva en sistemas intensivos de cultivo, alcanzando hasta $400 \text{ ton ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de materia fresca (Gallegos y Mondragón, 2011), y está bien adaptada al cultivo en cubiertas plásticas practicado en la altiplanicie mexicana.

‘COPENA V1’ *O. ficus-indica* (L.) Mill.

En términos de origen, esta variedad es la única derivada de un programas de mejoramiento genético, fue obtenida por el extinto Dr. Facundo Barrientos en el Colegio de Postgraduados de Chapingo, México. la planta es vigorosa, de crecimiento rápido, sus cladodios son gruesos, aovados, de tamaño mediano y sin espinas. Aunque fue seleccionada para la producción de nopalitos, sus frutos son atractivos, morados, grandes y dulces, de jugosidad intermedia y con semillas medianas. Se sabe que el mejorador distribuyó material vegetativo en varios estados de México, no existen cifras de la superficie plantada (**Figura 1**).

Otras variedades menos conocidas que se usan para producir nopalito en zonas semiáridas tropicales son:

- ‘Valtierrilla’, cultivada en una pequeña área del po-



Figura 1
Variedades de nopal de
verdura (en el sentido
de las manecillas del
reloj: "Milpa Alta"
"Atlixco" o "Negrito",
"Blanco", "Valtierrilla")



blado del mismo nombre en el Bajío del estado de Guanajuato, caracterizada por sus cladodios pequeños con espinas grandes y densas, por lo que se usan solamente pencas pequeñas y tiernas, comercializadas como "nopalitos cambrey o baby" sensible al daño por heladas, se comporta bien en salmuera y vinagre.

- **'Blanco'** (*Nopalea cochenillifera*) (Figura 1), cultivada en los estados de Michoacán y Tamaulipas además de Valtierrilla, Gto., muy sensible a heladas, pero se comporta mejor que "Milpa Alta" cuando se envasa - lo cual ha permitido el florecimiento de pequeñas industrias-. Existen otros tipos locales para este mismo propósito en el estado de San Luis Potosí, pero estos pertenecen a la especie *O. robusta*. (Figura 1).
- **'Spineless 1308'** (*Nopalea cochenillifera*), seleccionada por P. Felker en Kingsville, Texas, de colectas obtenidas de la región tropical de Tamaulipas, México, cultivada en EUA, en la región costera de Texas y también en Tamaulipas.

IMPORTANCIA AGRICOLA DEL CULTIVO DE NOPALITOS

El cultivo de nopalitos alcanzó el status de cultivo formal en México en los 1980s, cuando las estadísticas oficiales reportaron dos zonas productoras importantes, Milpa Alta y Tlalnepantla Morelos, ambas localizadas en las cercanías de la

ciudad de México, cubriendo aproximadamente 2 000. Esta ciudad y su área conurbada es todavía el mercado más importante de hortalizas a nivel nacional incluyendo de nopalito fresco, su población era de 21 millones de habitantes según el censo más reciente (INEGI, 2010). (Tabla 1). A partir de los 1990, la urbanización, el crecimiento demográfico combinado con las nuevas investigaciones sobre los beneficios a la salud atribuidos al consumo de nopalitos, condujo al incremento del área plantada, para 2010, esta se había expandido de 5 269 a 12 201 hectáreas. Esta superficie coloca al cultivo de nopal en el doceavo lugar dentro de los cultivos hortícolas, un indicador claro de su importancia (SIAP, 2015). Actualmente las plantaciones de nopal de verdura están dispersas en la parte central, occidental y noreste de México. una proporción significativa de la producción es destinada para el consumo nacional (90%): sin embargo, la exportación a los Estados Unidos de América ha ido creciendo continuamente durante la década pasada, facilitada por el Tratado del Libre Comercio de Norteamérica (NAFTA) y otros tratados similares.

El consumo per cápita de nopalitos en México en 2013 alcanzó 6.4 kg, con una demanda concentrada en las regiones centro y norte, donde el producto fresco ya está disponible todo el año. hace solamente una década, el consumo de los nopalitos era significativo solamente en la Semana Santa, actualmente gracias a la información

TABLA 1 Área cultivada con nopal y sus productos

Producto	Superficie plantada (ha)	Irrigada	No irrigada
Tuna	55 254	720	54 534
Forraje	16 266	42	16 266
Nopalitos	12 039	3 204	8 835
Nopal silvestre*	3 000 000 (1.5% del territorio nacional)		

Fuente: SIAP (2015) and *Soberon et al. (2001).

acerca de sus propiedades funcionales, la demanda se ha incrementado, y los nopalitos se han convertido en un artículo común en la sección de hortalizas de los supermercados.

A pesar de la creciente popularidad de los nopalitos en México, su consumo no ha crecido en otros países. Existe una falta de información sobre los modos de preparación y los efectos benéficos en la salud atribuidos a su consumo regular, asimismo el producto cocinado no es atractivo. Los posibles consumidores son desanimados por las espinas del nopal y las gloquidas y la liberación de mucilago durante la preparación. A pesar de la intensa promoción del consumo de nopalitos en el Este y Norte de África donde existen poblaciones naturalizadas de nopal y huertas comerciales, no se ha tenido el impacto deseado, lo mismo ha sucedido en la India y Brasil.

Lo mismo que otros vegetales, los nopalitos están sujetos a regulaciones sanitarias y al respecto en México ya se cuenta con normas específicas para nopalitos de *Opuntia* spp. (NMX-FF-068-SCF1-2006 para el mercado nacional, y CODEX STAN 185-1-993 para exportación). Ambas normas se relacionan al color, ausencia de deformaciones, plagas y enfermedades y de contaminantes. Adicionalmente existen campañas oficiales enfocadas a la importancia de ofrecer al consumidor un producto higiénico, seguro y libre de contaminantes. La aplicación de estas normas podría asegurar e incrementar la presencia de los nopalitos en los mercados internacionales.

SISTEMAS DE PRODUCCION DE NOPAL DE VERDURA

Recolección de nopaleras silvestres

La recolección de *nopalitos* es todavía una actividad tradicional en las regiones semiáridas central y norte de México, la cual - en teoría - cubre 3 millones de hectáreas (cifra probablemente sobreestimada, dado que

incluye muchas zonas donde la densidad de plantas por hectárea es de unas cuantas plantas). Los nopalitos están usualmente disponibles al final del invierno e inicios de la primavera, dependiendo de la intensidad y duración del periodo de heladas. Las especies más usadas para la recolección son *O. streptacantha*, *O. robusta*, *O. leucotricha* y *O. xocconostle*. El producto obtenido es vendido en mercados locales. Se caracteriza por presentar disponibilidad irregular de pequeños volúmenes de calidad variable. La recolección ha perdido atractivo gradualmente conforme las nopaleras naturales disminuyen, debido a la expansión del pastoreo, la agricultura y el crecimiento urbano. Las nopaleras silvestres también están expuestas a los efectos de desastres naturales: heladas severas, sequía e incendios espontáneos, fenómenos exacerbados por el cambio climático. La alternancia de la producción o crecimiento cíclico también afecta el volumen de nopalitos y fruta colectada de plantas silvestres .

Huertos de traspatio

Los huertos de traspatio son comunes en las zonas rurales, se caracterizan por la alta diversidad de especies de nopal, y el uso múltiple y la dominancia de tipos sin espina que pueden ser utilizados completamente, proveyendo cladodios tiernos, frutas y ocasionalmente pencas maduras para los animales domésticos. Los huertos familiares con nopal son comunes en la región norte centro de México. Estos han funcionado como reservorios de genes y como sitios de hibridación natural entre las variedades locales, fenómeno que proveyó las variedades que actualmente sustentan el mercado moderno de tuna y nopalitos (Pimienta Barrios, 1990).

Producción tradicional a cielo abierto

Este sistema de producción comenzó en Milpa Alta -la región productora más antigua de México - localizada en la zona sur conurbada de la Ciudad de México - durante los 1950s, se ha expandido a los estados vecinos de Morelos, Puebla e Hidalgo. El sistema usa plantas arbustivas (<1.80 m) que se inician de cladodios indivi-



duales plantados en hileras separadas a 0.80-1.50 m y 50-75 cm de separación sobre la hilera, resultando en densidades de 10 000-40 000 plantas ha⁻¹ (**Figura 2**). El cladodio basal o madre es formado con dos o tres ramas, que llenan completamente la hilera, pero la cobertura es parcial entre hileras permitiendo el tránsito en todas las hileras. La cosecha empieza a los tres meses de plantadas, colectando el exceso de cladodios una vez que se han seleccionado aquellos que servirán de ramas primarias. Dado que el sistema es a cielo abierto, es altamente dependiente de la humedad del suelo y la temperatura ambiente. Los nopalitos tiernos son muy sensibles a heladas, y aun periodos cortos de frío pueden dañar la corona del nopalito, afectando su forma final, la productividad y apariencia del producto. Por lo tanto la extensión de la época de cosecha es definida por la duración del periodo libre de heladas. En las partes altas de México, este periodo se extiende de mediados de marzo a finales de octubre, dependiendo de las variaciones del microclima local. La emergencia continua de nopalitos nuevos es también una respuesta a la cosecha oportuna, debido a que la remoción continua estimula la brotación de nuevos cladodios. Por el contrario si las condiciones de mercado no son convenientes, el retraso de la cosecha detiene la brotación.

Minituneles de plástico

Este sistema representa el primer intento de controlar los efectos de las heladas en la producción de nopalitos. Fue inicialmente adoptado para usarse en huertos familiares durante la década de 1970-1980 y todavía se encuentra en uso en numerosos huertos pequeñas de México. Se usa una cama o melga ancha (120-150 cm), con 3-4 hileras de pencas, espaciadas a 30-40 cm, la distancia entre plantas sobre la hilera varía entre 20-30 cm. El número de hileras varía con el ancho de los túneles. Con el criterio anterior, una fracción de cama de 2m de largo puede tener de 18 a 24 cladodios. La densidad de plantación final también varía de acuerdo al ancho de la cama y del corredor que las separa, la cual a su vez depende de la disponibilidad de mano de obra y transporte en el caso de huertos grandes, la remoción del producto cosechado, la aplicación de fertilizante y abono animal y aspersiones son realizadas con tractor, por lo que es necesario dejar una melga sin plantar cada 2-3 melgas. Los túneles de plástico son construidos con varillas de acero corrugado de 3/8 de pulgada (o calibre 9.5mm) formadas en arco, afianzadas al suelo, cubiertas con plástico transparente (calibre 600 mils) y reforzado con cuerda de polietileno colocada en forma diagonal sobre el túnel para proteger el plástico de la fuerza del viento. Los arcos son usualmente < 2m, diseñados para cubrir una sola cama de nopalitos, la ventilación es pasiva, provista por levantamiento manual de la cubierta plástica durante las horas más calientes del día.

Esta clase de estructura provee protección de heladas ligeras (en el rango de -1° C) su principal función es la reducción de vientos fríos e incrementar la temperatura durante el día (**Figura 2**).

Existen numerosas variaciones del diseño de plantación, que difieren en el ancho de cama, acomodo de los cladodios y altura de la cubierta plástica. Díaz y Maya (2014) describe un sistema útil para zonas tropicales:

Las camas deben de orientarse N-S para reducir la fuerza del viento y maximizar la exposición a la luz del sol, el tamaño de la cama será de 1.8 m de ancho y 45 m de largo, para optimizar el uso del rollo de plástico, que usualmente se adquiere de 100 m de largo. El túnel puede ser construido usando varilla corrugada de 3/8, cortada en piezas de 4 m de largo - suficiente para construir un túnel de 1.4m de alto - se forman en arcos de 1.8 m de ancho en la base. Los arcos se insertaran en piezas de manguera plástica de blanca o transparente de 1/2 pulgada de grueso, para proteger el plástico de quemarse por el contacto directo con el arco metálico bajo el sol. La punta de cada arco debe de insertarse en el suelo al menos 30 cm para proveer resistencia a la estructura, los arcos se colocan a cada dos metros de separación. El plástico es colocado sobre los arcos y la orilla enterrando una orilla de cada lado firmemente en el suelo. Se recomienda plástico transparente de invernadero con protección anti UV, calibre 600 mils. La otra orilla se mantiene en su lugar usando costales rellenos con suelo, de modo que puedan ser removidos fácilmente para ventilar el túnel cuando la temperatura rebasa 35° C. En cada extremo del túnel se entierra una estaca de madera ubicándola a 1.2m de retirado del extremo del túnel, esta estaca retendrá 7 cuerdas de polietileno las cuales se estiran y colocan sobre el túnel sobre cada arco, distribuyéndolas uniformemente por los lados del túnel ayudando a este a mantener su forma semi-cilíndrica.

Invernaderos de baja tecnología

Al igual que muchos países subtropicales México está experimentando un boom en la agricultura protegida, y los materiales importados necesarios en los invernaderos están fácilmente disponibles para la producción de hortalizas. Las tendencias de mercado favorecen la producción fuera de temporada así como la producción continua todo el año como resultado del incremento de la demanda de hortalizas, beneficiando a productores y consumidores. Dada la buena respuesta del nopal a la irrigación, la alta temperatura y los fertilizantes, la producción bajo cubierta es la tendencia en las áreas productivas tradicionales y nuevas. Se han adaptado varios diseños para producir nopalitos tomando ventaja de la rusticidad de la planta. Los invernaderos para producir nopalitos usualmente son simples, proviendo poca protección contra heladas pero

**Figura 2**

Sistemas de producción de nopalitos (a cielo abierto en Tlanepantla Mor. México; en Minituneles e invernadero).

manteniendo un rango benéfico de temperatura (10-30°C). La atenuación de las temperaturas altas se consigue con ventanas laterales operadas manualmente. Dado que el nopal es una planta erecta por naturaleza, la cantidad de metal se reduce al mínimo: postes de 2x2 colocados a cada 2-3m, arcos de fierro galvanizado soldados en el sitio y reforzados con ensambles de acero, y asegurados al suelo con un mínimo de concreto. El túnel varía de 6 a 9 m de ancho, dependiendo de los medios del productor, el diseño de plantación en camas se optimiza para maximizar el uso de la superficie cubierta (**Figura 2**).

Macrotuneles

Estas estructuras son diseñadas para proveer cubierta y protección contra alta radiación, lluvia excesiva, granizo y daños por viento, mejorando en consecuencia la calidad del producto. Fueron introducidos a México para cultivos de alto valor, como las plántulas de hortalizas, fresas, frambuesas, arándanos y pimientos, pero están siendo adoptados gradualmente para la producción de nopalitos, especialmente en zonas tropicales con bajos riesgos de heladas. El macrotúnel típico no tiene paredes, es construido con 2 o 3 tubos asegurados al piso, con arcos de tubo de acero y cubierta de polietileno con protección anti UV. Son de 4-5 m de ancho y 2-3 m de alto, son relativamente fáciles de armar y más baratos que un invernadero rustico. El diseño de la plantación

es usualmente en camas, optimizado para usar el máximo de espacio protegido, el riego es provisto por mangueras de goteo estándares (**Figura 3**).

Nopalitos en hidroponía

El sistema de hidroponía es el más avanzado en la producción de nopalitos, para lo cual se cuenta con un modelo experimental diseñado y promovido por el Centro Regional de Zonas Áridas y Semiáridas (CREZAS) de el Colegio de Postgraduados. Este sistema está basado en el invernadero típico con cubierta de polietileno y enfriamiento pasivo, cuenta con subirrigación e incluye cubierta plástica para el suelo sobre los pasillos para asegurar el máximo ahorro del agua de riego, de los fertilizantes y buen control de maleza. Las plantas son establecidas a alta densidad y mantenidas como arbustos para reducir la competencia y mejorar la intercepción de la luz por la planta de nopal (**Figura 4**).

PRACTICAS DE PRODUCCION

Nutrición del cultivo

El nopal es considerado un cultivo rustico, capaz de sobrevivir en suelos pobres de zonas secas. Sin embargo, si la planta se ubica en suelos de buena calidad, con abundante fertilización y riego, la productividad se incrementa significativamente.

Figura 3

Invernadero de baja tecnología para la producción de nopalitos en San Luis de la Paz, Gto. México. Vista general, techo, y cimentación.

**Figura 4**

Producción de nopalitos en macrotuneles (9.6 m de ancho y 4.3 m de altura); nopalitos plantados en camas anchas (1.4 m y 1.4 m de pasillo), unidad hidropónica para producción de nopalitos (CREZAS-CP San Luis Potosí, México).



El efecto benéfico de la combinación de estiércoles y fertilizantes químicos en nopal fue reportado por Mondragon Jacobo y Pimienta Barrios (1990). También se consiguen altas respuestas expresadas en más cladodios frescos por planta usando otras fuentes orgánicas de nutrientes, tales como la vermicomposta, estiércol composteado y productos con micorrizas.

La productividad de los nopalitos o del nopal forrajero puede ser expresada en kg de nopalitos por planta, esta es función de la variedad, del ambiente y las prácticas de manejo del cultivo, incluyendo la fertilización. Se conoce poco de los requerimientos de nutrientes del nopal o de las interacciones sinérgicas o antagonistas entre los nutrientes en los diferentes sistemas de producción. Blanco Macías *et al.*, (2006) reportaron una interacción positiva ente el mg-Ca, Mg-K y K-P, comparada con una interacción antagónica y significativa entre Ca-N y Mg-N. el rango de concentración óptima para cinco nutrientes esenciales para obtener un rendimiento de 46.7% kg de materia fresca (considerando únicamente cladodios) es: N= 1.29 ± 0.47 : P= 0.35 ± 0.08 %: K = 4.24 ± 0.88 %: Ca = 4.96 ± 1.73 %, Mg = 1.61 ± 0.27 %.

La información precisa sobre la nutrición del nopal de verdura fue también reportada por Magallanes Quintanar *et al.*, 2004, Valdés Cepeda *et al.*, (2009) y Blanco Macías *et al.*, (2016), después de varios años de experimentación de campo. De acuerdo a la técnica de la curva de aproximación, los requerimientos de nutrientes dependen de la cantidad de nutrientes disponibles en el suelo, el rendimiento esperado y la densidad de plantación. Para obtener 95% del rendimiento óptimo ($56-60 \text{ kg planta}^{-1}$) y asumiendo un contenido aproximado de materia seca del nopal del 5%, la planta necesita adquirir 23.7 g de N, 7.06 g K, 95.36 g Ca y 41.7 g de Mg. Para una densidad de $10\,000 \text{ plantas ha}^{-1}$, el suelo debe suministrar 24 kg N, 71 kg P, 1124 kg de K, 954 kg de Ca y 417 kg de Mg ha^{-1} , para un rendimiento teórico de 564 ton ha^{-1} de materia fresca o 28 ton de materia seca ha^{-1} . Valdés Cepeda *et al.*, (2009) advierte que la alta respuesta del nopal a la fertilización nitrogenada, y la posibilidad de su acumulación de nitratos a niveles tóxicos en los cladodios, es potencialmente nociva en nopal forrajero y de verdura.

La adición de estiércol (principalmente fresco o parcialmente composteado) es tradicional en el cultivo de nopalitos debido a la alta respuesta de la planta de nopal, bien conocida por los productores mexicanos, que han alcanzado aplicaciones record de 800 ton ha^{-1} de estiércol fresco, observado en la región de Milpa Alta (Fernández *et al.*, 1990: Aguilar, 2007: Flores 2013). Estas altas dosis son justificadas si se observa el largo efecto residual y el mejoramiento de las propiedades del suelo: sin embargo, también pueden resultar en quemaduras si son aplicadas durante los meses más ca-

lientes del año. Los experimentos de campo conducidos por Zúñiga Tarango *et al.*, (2009) demostraron que la aplicación de 100 ton ha^{-1} es suficiente para obtener rendimientos entables de nopalitos.

La aplicación de estiércol es un tema actual, debido al creciente interés por productos orgánicos en los mercados modernos y al incremento incesante del costo de los fertilizantes sintéticos. La experiencia directa de los productores y los resultados de la investigación apoyan el valor de las dosis adecuadas de fertilización y riego para obtener altos rendimientos (Flores, 2012). Las fuentes abonos y las dosis usadas dependen de la disponibilidad. La fuente más común es el abono vacuno fresco obtenido de establos lecheros, seguido del de cabra y pollo.

Debido al incremento en el costo del transporte existe también interés en las compostas. En un estudio sobre producción de nopalitos en Milpa Alta, México, Aguilar (2007) reporto rendimientos similares ($45-60 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) con la aplicación de $3.3 \text{ to ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de vermicomposta obtenida de abono vacuno en vez de las $800 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de abono vacuno fresco. Dado el hábito perenne de la planta de nopal, la aplicación de abonos puede ser repetida cada 2-3 años, dependiendo de la dosis inicial, la decisión de hacerlo en una sola aplicación o dos dependerá del costo del transporte y la mano de obra local.

La fertilización, el riego y la poda están asociados con la rápida brotación de las nuevas yemas vegetativas. Pero es necesario un manejo cuidadoso para reducir los daños por heladas, optimizar el agua de lluvia y más importante, tomar ventaja de ventanas específicas de mercado. La época de lluvias en la parte central de México presenta algunas variaciones, pero básicamente sigue un patrón bimodal, empezando al final de junio, con una depresión ligera en agosto e incrementándose nuevamente en septiembre. El riesgo de heladas se incrementa de finales de octubre hasta marzo, cuando la demanda de nopalitos está en su máximo. Bajo estas condiciones, los abonos y fertilizantes deben ser aplicados al final de la estación de lluvias o al inicio de la primavera, si se cuenta con riego. En el caso de plantaciones de temporal, los fertilizantes y abonos pueden ser incorporados antes de que terminen las lluvias. El exceso de fertilización puede causar quemaduras de los cladodios y oxidación rápida de los nopalitos pelados.

Riego del cultivo

El riego por goteo es un método eficiente en las plantaciones de nopal, sus ventajas incluyen (Vázquez-Alvarado *et al.*, 2009):

- Capacidad para aplicar fertilizantes solubles
- Ahorro del 30 al 50% de fertilizantes (comparado con riego en surcos o aspersión)



- Reducción de la competencia de malezas y
- Mejoramiento de la conservación del suelo y del agua.

Orona Castillo *et al.* (2003) elaboraron datos específicos en el uso del agua, basados en un estudio de comparación del riego superficial y riego por goteo en tres niveles de humedad del suelo 30, 45 y 60% de la evaporación diaria (tanque de evaporación tipo A), para varias especies de *Opuntia*. Estos autores reportan que para alcanzar un rendimiento total de 100.4 ton ha⁻¹ con 18.8 kg de nopalitos por m³ de agua. El consumo total de agua fue de 5 340 m³ ha⁻¹, i.e. menos que el requerido para producir maíz o frijol y forrajes (que necesitan entre 5 500 a 18 000 m³). Basados en estos datos, los autores recomiendan para las variedades de nopalito de *O. ficus-indica*: riego al 45% de la evaporación diaria y aplicación anual de 161, 60.7 y 914 kg ha⁻¹ de N, P y K, respectivamente.

Por otro lado, Flores (2013) estimó un consumo de agua de 391.9 mm año⁻¹, basado en datos obtenidos de una plantación en surcos, con un sistema de riego por goteo. Las plantas deben de ser regadas cuando la tensión hidráulica del suelo alcance 365 cb, asociada a un consumo diario de 1.1 mm, i.e. 2 321 m³ ha⁻¹ de agua por año⁻¹. La productividad estimada del agua del nopal de verdura fue de 11 kg m³ para plantas de *O. ficus-indica* fertilizadas con estiércol vacuno de establo y fertilizante sólido triple 17, la productividad de este tratamiento fue significativamente superior que la productividad del testigo (76 kg m³). El calendario de riego recomendado incluye cuatro riegos, los primeros dos cuando el tensiómetro indique 35 y dos cuando alcance 70 cb. Las necesidades de agua varían con la localidad, Nobel (1998) estimó 3.27 mm día⁻¹ para California, mientras que Fierro *et al.*, (2003) registraron 1.65 mm día⁻¹ en Milpa Alta, México. Finalmente para mejorar la eficiencia del riego, es necesario considerar la distribución de la lluvia y evitar el riego excesivo, usando una sola línea de riego para dos hileras de cultivo.

Formación de la planta

La poda de formación para producción de nopalitos está dirigida a obtener una planta de forma regular, evitando las ramas que se dirigen hacia el pasillo y manteniéndola a una altura inferior a 180 cm (en el sistema de producción de hileras o setos) o por debajo del cuarto piso de cladodios en el sistema de camas en minitunel. Durante la formación se elimina el exceso de cladodios producidos en el segundo piso. Usualmente se dejan 2 a 3 ramas principales en las plantas de nopal, configuradas como "orejas de conejo" o abanico, las restantes pueden ser vendidas o descartadas, en la práctica, la formación en

realidad es concebida como una cosecha, sin embargo, cuando el mercado no es atractivo, la poda de cladodios maduros se programa en base a una fecha estimada de la recuperación de precios.

Disposición de residuos de poda

Un ejemplo notable de utilización de los residuos de poda es la incorporación inmediata de los nopalitos frescos picados al campo de donde fueron colectados. Para esta operación los productores usan machetes o cuchillos. Recientemente se han importado picadoras especializadas de Brasil, maquinas que originalmente fueron diseñadas para preparar nopal forrajero, también existen maquinas similares de diseño mexicano. Esta práctica incrementa la humedad del suelo, así como el contenido de materia orgánica y suprime las malezas temporalmente.

Plagas y enfermedades

La mayoría de las plagas presentes en las huertas de nopal tunero se encuentran también en las plantaciones de nopalito, sin embargo, su incidencia y daño es limitado debido al efecto de la poda continua. Las plagas más serias en la producción de nopalito es la grana cochinitilla y el gusano cebra (*Olycella nephelepsa*), el gusano blanco del nopal (*Megastes cyclades*) y el barrenador de la base de las pencas (*Metapleura potosi*). Asimismo, también se presentan los picudos del nopal (*Metamasius spinolae*) el picudo perforador (*Gerstaeckeria* spp.) y el picudo de las espinas (*Cylindrocopturus biradiatus*). La gallina ciega (*Phyllophaga* sp.) es una plaga importante en plantaciones ubicadas sobre suelos volcánicos ligeros. La descripción detallada de estos insectos se presenta en el Capítulo 11.

Cosecha de nopalitos

Los cladodios tiernos pueden ser cosechados entre 30 y 60 días después de la brotación, cuando alcancen un peso de 80-120 g y una longitud de 15-25 cm (Flores Valdés, 1995). Los nopalitos presentan espinas y gloquidas, por lo que usualmente se requiere usar guantes de látex para su cosecha. Las pencas tiernas son removidas cuidadosamente insertando el cuchillo en la base del nopalito, una operación que requiere habilidad para cosecharlos intactos. Son depositados en cestos o cubetas de plástico (**Figura 5**) y seleccionados de acuerdo a los tamaños estándar requeridos por el mercado: pequeño o cambray, mediano y grande. Dependiendo del mercado de destino el productor puede empacarlos en pacas rectangulares envueltas en plástico o pacas cilíndricas cubiertas con papel de envoltura.

TECNICAS BASICAS DE PREPARACION

Remoción de espinas o pelado de nopalitos

El método de limpieza más común es todavía la eliminación manual de espinas usando un cuchillo afila y guantes de neopreno. Se han probado otras herramientas como cuchillos con navajas afeitadoras, cucharas huecas y afiladas, peladores de papas, etc., pero con poco éxito. También fue propuesta una maquina a base de láser, de alto costo y baja eficiencia, que nunca paso de la fase del modelo. Recientemente, se introdujo una maquina basada en navajas rotatorias construida en acero inoxidable propuesta para limpiar grandes volúmenes de nopalitos para la industria de las conservas. Esta fue desarrollada por inventores mexicanos y es promovida bajo la marca Nopalli (<http://agrocentro.org/#services/c21r>) y puede ser ajustada a diferentes formas y tamaños de nopalitos. La máquina es capaz de procesar hasta 40 piezas por minuto⁻¹ con un desperdicio <15%. El mismo fabricante ofrece otra máquina diseñada para rebanar los nopalitos en tiras o cuadros pequeños (**Figura 6**).

La remoción completa de espinas y gloquidas a mano requiere habilidad y práctica, una demostración que puede ser vista por el público se presenta en el video disponible en <https://youtube.com/watch?v=XfekDxpqB-1>.

La limpieza de los nopalitos en el punto de venta es una prueba efectiva de la frescura del producto. Esta idea ha sido implementada exitosamente en los supermercados mexicanos donde se ofrece el producto recién limpiado ya sea en pequeños dados o tiras, como el consumidor los prefiera.

Reducción de la presencia de mucilago

El mucilago es una característica de todas las opuntias, este es liberado como respuesta a las heridas. La cantidad liberada depende de la variedad, la edad

de los cladodios y la intensidad de la deshidratación. El mucilago es también liberado durante la cocción, que regularmente se realiza por ebullición. Sin embargo, el mucilago no puede ser eliminado completamente de los nopalitos sin importar el método de preparación. Existen varias prácticas que reducen o enmascaran la su presencia en el platillo final:

- Adición de hojas de orégano, laurel o tallos de cebolla picados, cascara de tomatillo, granos de sal de mar, bicarbonato de sodio, jugo de limón, hojas de mazorca de maíz o dientes de ajo, su elección depende de la receta que esté preparando.
- Interrupción de la ebullición por medio de inmersión en agua helada.
- Agregar unas pocas monedas de cobre o plata durante la ebullición, aunque este método en particular es el menos recomendable por el alto riesgo de contaminación.
- Escaldar con sal común y orégano por 7 minutos (Pensaben *et al.*, 1995).

Entre más agresivo sea el método de cocción, mayor es el efecto negativo en el contenido de vitaminas y minerales, reduciendo las propiedades funcionales y los efectos benéficos del consumo de nopalitos. El método de sal y orégano (Pensaben *et al.*, 1995) reduce la presencia de mucilago sin afectar el color verde típico de los nopalitos.

El escaldado y procesado en salmuera es el método estándar usado para la industria restaurantera en México, este producto propicio la popularización de los nopalitos durante los noventas.



Figura 5
Empaque de nopalitos con polietileno de 20-30 kg y en la tradicional paca cilíndrica de hasta 300 kg ó 4 500 nopalitos

Acidez de los cladodios

Los nopalitos se caracterizan por su acidez - la cual es debida a la ruta fotosintética CAM típica de las opuntias - esto puede afectar la aceptación de los nuevos consumidores-. La acidez varía significativamente (0.1 -0.5% de acidez titulable) dependiendo de la hora del día. La acidez disminuye durante el día e incrementa en la noche, independientemente de la hora de cosecha (Corrales García, 2010).

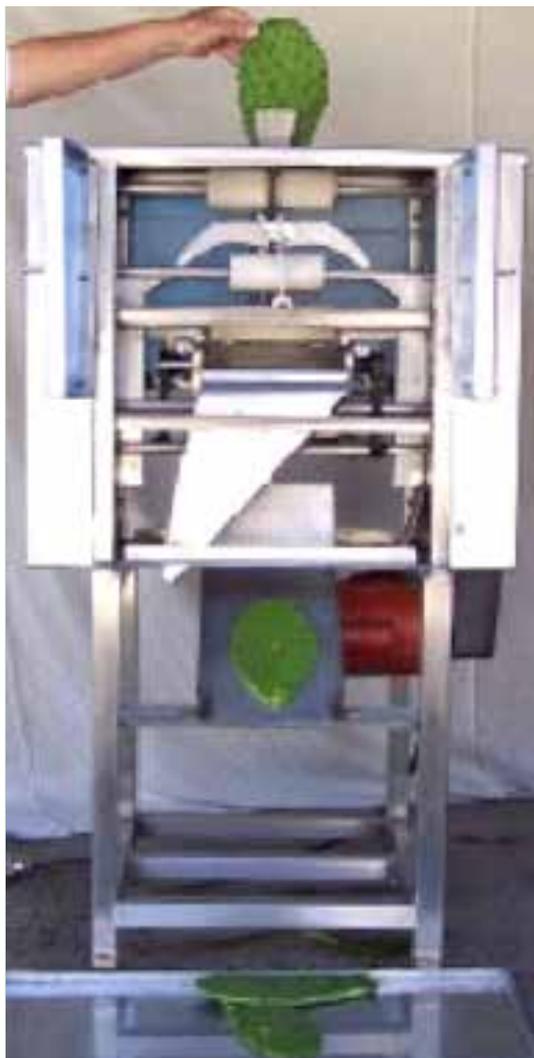
De acuerdo con Flores Hernández *et al.*, (2004) la acidez de varios cultivares de nopalitos decreció durante el día en relación a la exposición a la luz - respuesta típica de las plantas CAM -. Aun cuando estén desprendidos de la planta, las variaciones son evidentes, dado que el cladodio permanece vivo y fotosintéticamente activo. Cantwell *et al.*, (1992) reportaron valores de pH de 0.94% en la mañana decreciendo a 0.47% en la tarde, por lo tanto Pimentel González, (2013) recomienda que la co-

secha de nopalitos se realice 2 horas después de la salida del sol. En cualquier caso, la cosecha se hace tradicionalmente en las horas de la mañana cuando la humedad es más alta y los trabajadores se exponen menos a las gloquidas, y por la temperatura es la mejor hora para trabajar en el campo.

La acidez parece depender de la variedad, de acuerdo con Aguilar Sánchez (2007), quien estudio 21 cultivares usados como verdura: 'Jalpa", "Morado" e "Italiano" presentaron alrededor de 0.43%; "Milpa Alta" 0.68%; "Oreja de Elefante" cultivar también usado como forrajero, 0.69%. El mismo estudio revelo que las variedades "Jade" y "Negrito" presentaron menos oxidación, otro carácter importante para la agroindustria.

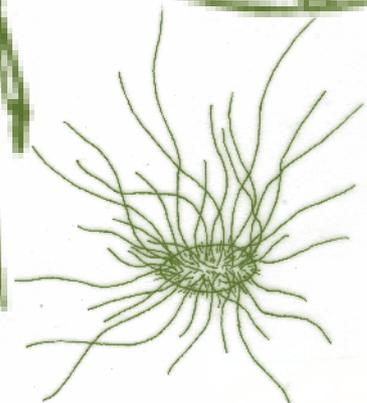
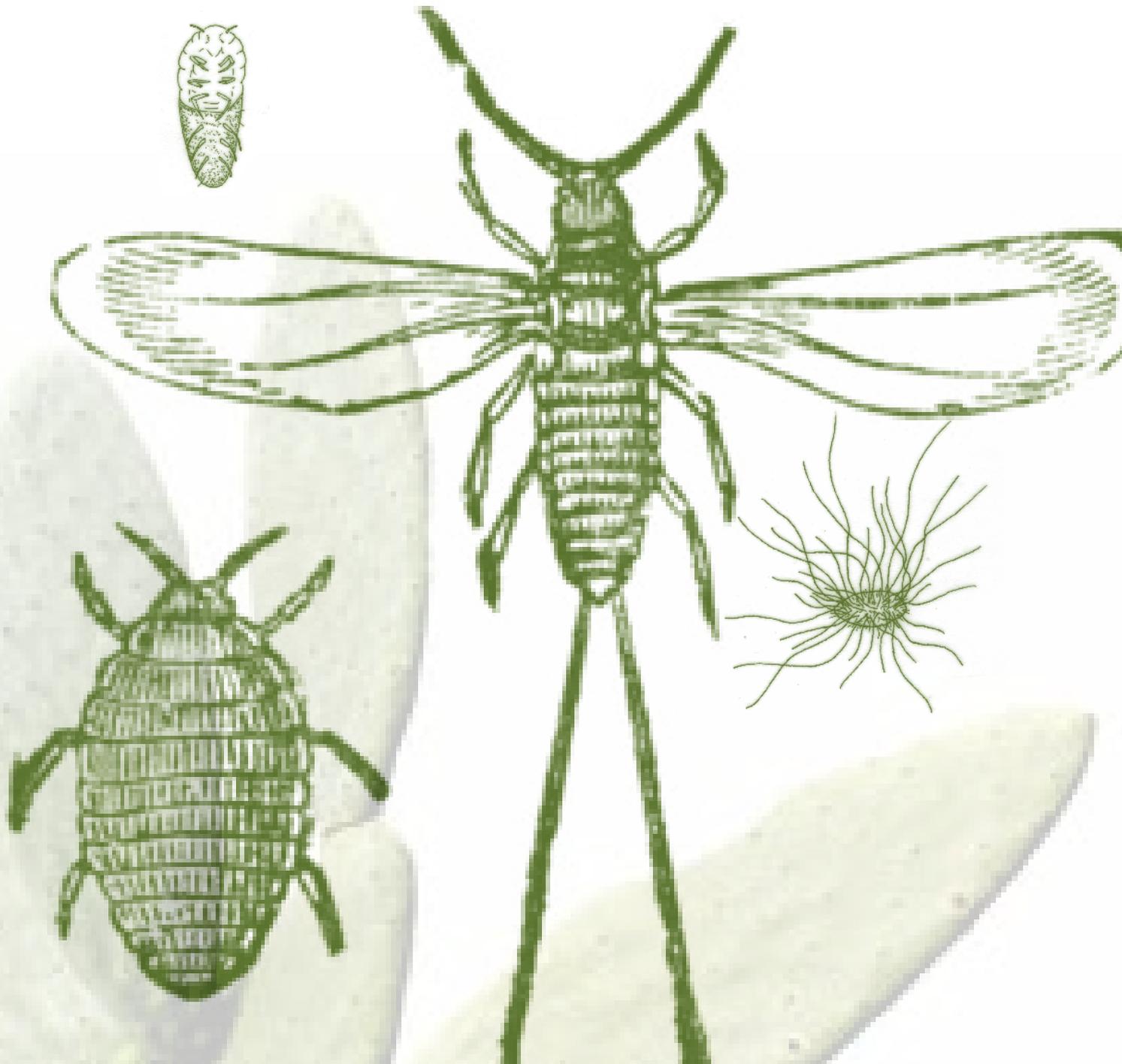
La acidez puede ser modificada por medio de la temperatura de almacenamiento. El almacenamiento en frío (5°C) mantiene o incrementa ligeramente la acidez, mientras que el almacenamiento a temperatura ambiente (20°C) reduce la acidez. Estas fluctuaciones modifican el sabor de los nopalitos, y de acuerdo con Corrales García *et al.*, (2004), el tiempo de proceso y consumo son más importantes que la hora de cosecha.

Figura 6
Maquinas desespadoras y rebanadoras de nopalito. Industrias Mad, Monterrey, N.L. México



Cría de grana cochinilla

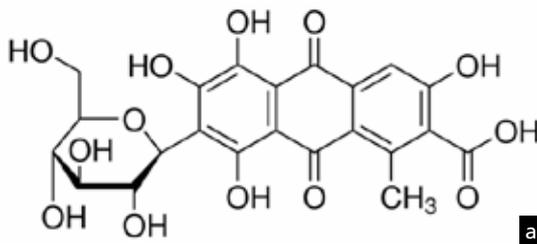
Liberato Portillo y Ana Lilia Viguera
Departamento de Botánica y Zoología
Centro universitario de Ciencias Biológicas y Agrícolas
Universidad de Guadalajara, Jalisco México



INTRODUCCIÓN

La cochinilla (*Dactylopius* spp) es un grupo americano de insectos Hemipteros (Spodek *et al.*, 2014) que se hospedan en plantas del genero *Opuntia*. La cochinilla es importante para la humanidad por cuatro razones:

1. El insecto es una fuente de ácido carminico, pigmento extraído (**Figura 1**) primordialmente de *Dactylopius coccus*, usado como colorante de alimentos, cosméticos, textiles y muchos otros productos (Cañamares *et al.*, 2006; Chávez Moreno *et al.*, 2009).
2. Algunas especies de *Dactylopius* has sido usados como agentes de control biológico contra cactus invasores (Githure *et al.*, 1999; Volchansky *et al.*, 1999; De Felice, 2004).
3. *Dactylopius* spp. puede convertirse en invasivo de especies de *Opuntia*, en sitios donde ellas no son nativas (Van Dam y May, 2012).
4. Existe investigación actual sobre las propiedades antioxidantes y antimicrobianas del ácido carminico, para elucidar sus aplicaciones potenciales en inmunología, tratamiento de aguas residuales y en celdas solares (Gonzalez *et al.*, 2009; Garcia Gil *et al.*, 2007; Bae y Hih, 2006; El Moselhy *et al.*, 2011).



Durante mucho tiempo ha existido controversia sobre el origen de la cochinilla (*D. coccus*), algunos autores mencionan Sudamérica (Rodríguez y Niemeyer, 2000; Rodríguez *et al.*, 2001). Sin embargo, la investigación actual conduce a la aceptación de su origen en América del Norte, donde ocurre su hábitat nativo ocurre y donde ha coevolucionado con factores bióticos y abióticos, principalmente plantas hospederas (**Tabla 2**) y enemigos naturales (**Tabla 3**) (Griffth, 2004; Portillo, 2005; Novoa, 2006). En base a datos de mtADN y modelos de nicho climático se ha establecido su origen en México (Van Dam *et al.*, 2015).

Por siglos la cochinilla ha sido uno de los pigmentos más importantes y actualmente todavía está en uso (Serrano *et al.*, 2011, 2013). Fue primeramente usado por las antiguas culturas de América (Donkin, 1977); Piña, 1977) y cuando los europeos arribaron a América, su uso y cultivo se dispersó. En el S. XIX, los primeros colorantes artificiales fueron sintetizados, marcado el declive de la grana hasta casi desaparecer. Sin embargo actualmente, el uso de pigmentos naturales esta nuevamente



Figura 1

a) Estructura química del ácido carminico;
b) diversidad de depredadores

creciendo gracias a sus propiedades benéficas para la salud, y la producción de cochinilla se está restableciendo con un amplio rango de tecnologías de producción en muchos países tropicales y subtropicales del mundo.

Este capítulo describe los varios métodos de cría de grana cochinilla y sus métodos de cosecha y manejo postcosecha, con un enfoque en su biología y ecología en sus áreas nativas y no nativas.

BIOLOGIA

Dactylopius es el único género de la familia Dactylopiidae (Hemiptera: Coccoidea). Contiene 11 especies, todas son parásitas de plantas cactáceas (De Lotto, 1974; Spodek *et al.*, 2014) y presenta una distribución dispersa (Van Dam y May, 2012), nativa de:

- Sudamérica: *D. austrinus* De Lotto, *D. confertus* De Lotto, *D. zimmermanni* De Lotto, *D. salmianus* De Lotto y *D. ceylonicus* Green; o
- Norteamérica: *D. bassi* (Tozzetti), *D. coccus* Costa, *D. confusus* (Cockerell), *D. gracilipilus* Van Dam and May, *D. opuntiae* (Cockerell) y *D. tomentosus* Lamarck.

Las especies más usadas para propósitos comerciales - debido a su alto contenido de pigmento (>20% de ácido carminico - es la especie domesticada, *D. coccus* o cochinilla fina. En la antigüedad era conocida como "nocheztli", una palabra Nahuatl que significa "sangre del nopal", en referencia al insecto y el pigmento que produce (Wright, 1963). En 1758, fue llamado *Coccus cacti* por Linneo, en 1835, Costa lo clasificó como *Dactylopius coccus* (Piña, 1977).

Dimorfismo sexual

Los machos de *Dactylopius* presentan alas en su instar adulto; son más pequeños que las hembras y muy móviles. Las hembras miden aproximada-

mente 6.24 mm, no tienen alas, son estacionarias y de forma ovalada, cubiertas por un polvo ceroso. Montiel (1995) señala que dado que los machos pasan por metamorfosis completa, los estados inmaduros deben denominarse estadios larvarios. Sin embargo, debido a que las características de dimorfismo no aparecen en los primeros estados inmaduros, y de que solo el cuerpo de la hembra se usa para obtener el pigmento, por conveniencia los estadios inmaduros se referirán como ninfas.

Ciclo de vida

Las hembras y machos pasan por la etapa de huevecillo y dos estados inmaduros (**Figura 3 a**), el ciclo biológico desde huevecillo a adulto dura entre 90 y 128 días, dependiendo de la temperatura y otros factores (Marín y Cisneros, 1977).

- **Ninfa I.** La hembra de este estado inmaduro pasa por dos subestadios; móvil y fija. El primero se le conoce también como caminador (**Figura 3b**) caracterizada por movimiento y ausencia de cera blanca; en menos de 24 horas, encuentra un lugar en el cladodio donde insertará su aparato bucal. Una vez que la ninfa se fija, pasa por un segundo subestadio, secretando grandes filamentos de cera sobre el cuerpo (**Figura 3c**); en pocos días, los filamentos desaparecen y dan lugar a un polvo ceroso.
- **Ninfa II.** Después de la primera muda (**Figura 3d**), el insecto en esta etapa inmadura es de color rojo brillante y en pocas horas se cubre con cera. Las etapas de Ninfa I y II no presentan diferencias ostensibles entre machos y hembras.
- **Hembra adulta.** La hembra de la cochinilla pasa por otra muda (**Figura 3f**) sincronizada con la copulación con los adultos machos. Durante esta etapa, la hembra incrementa de tamaño (**Figura 3g**). Cada hembra produce 420 huevecillos, pero aproximadamente el 10% de las hembras presentan infertilidad (Vargas y Flores, 1986), lo cual reduce la producción de nuevos caminadores.



Figura 2
Dos formas de coccidocultura, e) bajo cubierta y f) a cielo abierto

- **Macho adulto.** El macho de la cochinilla comienza su desarrollo en un capullo (**Figura 3h**) de donde emerge como adulto (**Figura 3i**). El macho presenta dos pares de alas, un aparato bucal no funcional y movilidad para buscar la hembra.

CRIA DE COCHINILLA

Factores bióticos y abióticos

La coccidocultura o cría de grana cochinilla es una actividad que puede llevarse a cabo en muchos

sitios de regiones tropicales y subtropicales, pero está condicionada por factores bióticos y abióticos, lo cuales es vital que se comprendan para saber cuáles de ellos operan en una área específica. Durante la época de lluvias es recomendable llevar a cabo la cría en cladodios aislados bajo cubierta. De hecho en la mayor parte de México la coccidocultura se hace en esta modalidad debido a:

- Factores abióticos- por condiciones desfavorables a cielo abierto; y
- Factores bióticos - esencialmente enemigos naturales (**Tabla 3**) de los cuales existe una gran diversidad en México (**Figuras 1b, c y d**).

Figura 3:

Ciclo biológico de la grana cochinilla, desde huevo hasta adulto

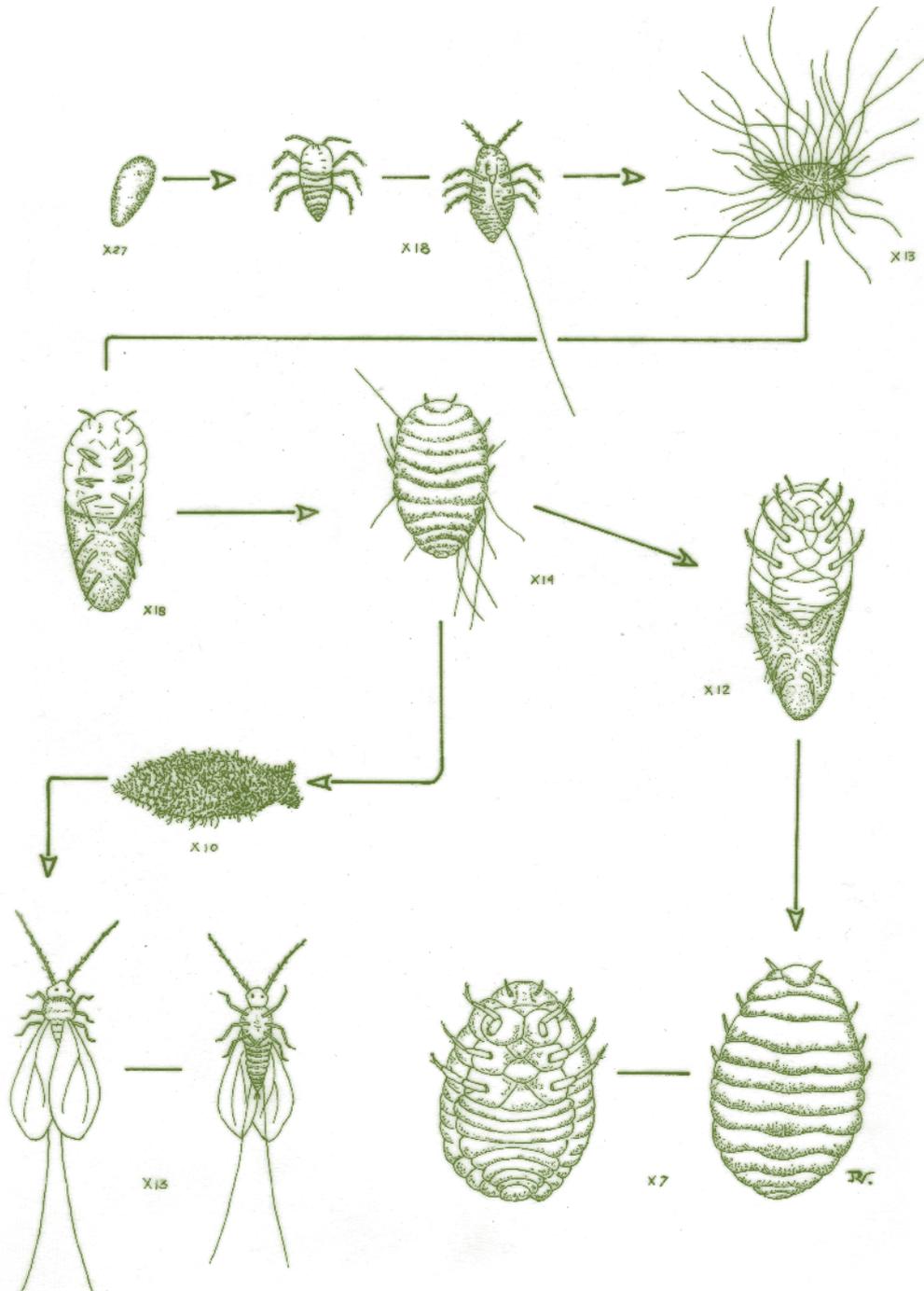


TABLA 1 Factores abióticos que limitan la cría de cochinilla

Factor	Efecto principal	Fuente
Temperatura	Alteración de la duración del ciclo biológico	Méndez, 1992
	Deshidratación de ninfas	Flores, 1995
Lluvia	Eliminación del 100% de la población de cochinillas	Flores, 1995
	Sofocación de la cochinilla	Alzate y Ramírez, 1777
	Dificultad para fijarse y desarrollarse	Flores, 1995
Viento	Fijación limitada de la cochinilla	Aquino, 1992
	Aumento de la dispersión y arrastre de ninfas	Flores, 1995
Luz	Influye en el movimiento de ninfas	Flores, 1995
	Permite el crecimiento y desarrollo de cochinilla	Aquino, 1992
Granizo	Tira las cochinillas al suelo	Alzate y Ramírez, 1777
Heladas	Eliminación del 50% de cochinilla	Alzate y Ramírez, 1777

La cría de cochinilla se ha reportado en diferentes variedades de *Opuntia* (Tabla 2) aunque las más importantes para la producción comercial son las variedades sin espinas: ‘Atlixco’ ‘Chicomostoc’ y Milpa Alta, todas pertenecientes a *O. ficus-indica*.

TABLA 2 Especies de *Opuntia* reportadas como hospederos de *D. coccus* en México

Especie hospedera	Fuente
<i>Opuntia amyclaea</i> Tenore	Vigueras y Portillo, 2014
<i>O. atropes</i> Rose	Rodríguez y Portillo, 1989
<i>O. cochenillifera</i> (L.) Salm-Dyck ^a	Piña, 1981
<i>O. crassa</i> Haworth	Vigueras y Portillo, 2014
<i>O. ficus-indica</i> (L.) Miller	Piña, 1981
<i>O. fuliginosa</i> Griffiths	Portillo y Vigueras, 2003
<i>O. incarnadilla</i> Griffiths	Vigueras y Portillo, 2014
<i>O. jaliscana</i> Bravo	Portillo y Vigueras, 2003
<i>O. megacantha</i> Salm-Dyck	Piña, 1981
<i>O. pilifera</i> Weber	Portillo y Vigueras, 2003
<i>O. sarca</i> Griff. ex Schein.	Portillo y Vigueras, 2003
<i>O. streptacantha</i> Lem.	Piña, 1981
<i>O. tomentosa</i> Salm-Dyck	Piña, 1981
<i>O. undulata</i> Griffiths	Portillo y Vigueras, 2003

^a Esta especie pertenece al subgénero *Nopalea*.

TABLA 3 Predadores de *D. coccus* Costa reportados en México

Especies	Orden y familia
<i>Laetilia coccidivora</i> Comstock	(Lepidoptera: Pyralidae)
<i>Eosalpingogaster cochenillivora</i> Guerin-Meneville	Diptera: Syrphidae
<i>Symphorobius amiculus</i> Fitch	Neuroptera: Hemerobidae
<i>Hyperaspis trifurcata</i> Schaeffer	Coleoptera: Coccinellidae
<i>Chilocorus cacti</i> Lineo	Coleoptera: Coccinellidae

Modificado de Vigueras y Portillo (2014).

Plantaciones de nopal para la cría de cochinilla

Las plantaciones comerciales de tuna dedicadas a la cría de cochinilla se hacen preferentemente con variedades sin espina, ya sea cielo abierto o bajo cubierta. Los cultivares más preferidos son los de frutas amarillas, pero también se encuentran de frutas blancas y moradas. Las plantaciones tienen en promedio 20 000 plantas ha⁻¹, densidad que puede variar de acuerdo a la calidad del suelo (buen drenaje), altitud (800 a 2300 msnm), temperatura (13-27°C) y disponibilidad de agua (Salas, 2016). Las plantas se abonan con 30 t año⁻¹ de estiércol (vacuno, cabra o aun de pollo), adicionalmente se requiere fertilizar con la fórmula N100-P50-K10).

Métodos de coccidocultura

Existen dos formas de coccidocultura; bajo cubierta y a cielo abierto (**Figuras 2e y f**). La opción a seguir depende principalmente de las condiciones climáticas locales. Las estructuras de protección para criar cochinilla se construyen tradicionalmente de madera, pantallas protectoras, hojas de palma, plástico (transparente o negro) y otros materiales (Santibáñez, 1990; Mendez, 2013); sin embargo en años recientes se han utilizado invernaderos grandes para la producción intensiva (Escalante, 2013). En seguida se describen los principales métodos:

- **Microtúnel.** Estructuras de altura aproximada de 1m, de polietileno o tela sombra de 1 mm de grueso (**Figura 4a**) para proteger las plantas hospederas infestadas de 2 a 3 años o cladodios individuales de 1 año (Vigueras y Portillo, 2014). Este método es útil en regiones donde son comunes las lluvias fuertes o inviernos fríos (0-10°C).
- **Tapesco.** Estas estructuras tienen un techo de juncos, madera, varas, palma tejida o plástico (Rodríguez y Portillo, 1989; Santibáñez, 1990). Se usan para colgar cladodios individuales maduros colgados para criar cochinilla o para incrementar una colonia en particular protegiéndola de factores indeseables.
- **Producción intensiva.** Este sistema (propuesto por la empresa Campo Carmín) fue implementado por primera vez en 2002. Los invernaderos están contruidos usando módulos. Cubren 1 356 m² y poseen una capacidad mínima de 432 000 cladodios sin espinas que cuelgan (Escalante, 2013). Este es el método más común en México (**Figura 2**).
- **Producción con riego.** En Perú y México existen plantaciones en hidroponía usando cladodios individuales, fertilizados con macro y micronutrientes para promover el crecimiento de la planta hospedera y de la cochinilla (Vigueras *et al.*, 1993). Este método es común en la costa sur del Perú (**Figura 2**) a cielo abierto, con altas densidades de plantación (aproximadamente 9 000 plantas por ha⁻¹) con fertirrigación e infestados manualmente (Flores, 1995).

Métodos de infestación

Independientemente del sistema de cría seleccionado, la infestación es necesaria para conseguir cosecha. El método de infestación debe de seleccionarse cuidadosamente. Ya sea que se infesten cladodios individuales o plantas completas (Llenderal y Campos, 1999). Es muy recomendable usar diferentes contenedores o "nidos" que contendrán las hembras en etapa de oviposición (OP). Frecuentemente se introducen nuevos métodos de oviposición a la producción a cielo abierto, que facilitan la oviposición y el trabajo, los métodos existentes se conocen como:

- **Oaxaqueño.** Se fabrican cilindros de palma tejida (10 cm de longitud y diámetro de 2 cm) donde se colocan hembras adultas en OP, los cuales son sostenidos por espinas clavadas en la planta hospedera durante ≤20 días de infestación. Los contenedores son cambiados entre plantas para obtener mejores resultados. En Bolivia, se aplica el mismo método usando fracciones de carrizo con pequeños hoyos (Tukuypaj, 1993), y recientemente en Perú se usaron fracciones de manguera de plástico.
- **Peruano.** Las hembras adultas en OP se introducen en pequeñas bolsas de tule (10 x10 cm), se cuelgan de las espinas de las plantas hospederas hasta que se observa la infestación (Quispe, 1983).
- **Ricci.** Se realiza una incisión triangular (2 x2 x 2 cm), y profundidad de 0.5 cm al centro del cladodio, el cual se deja deshidratar y sirve como soporte de las hembras adultas OP para facilitar la infestación.
- **Cladodio infestado.** Se colocan cladodios enteros infestados con hembras adultas OP en la base o entre dos cladodios de la planta hospedera para facilitar la infestación (Tukuypaj, 1993).
- **Tela de algodón.** Se colocan pequeñas fracciones de tela de algodón sobre las hembras adultas en OP permitiendo que los "caminadores" se suban en ellas, luego estas piezas de tela se colocan sobre la planta hospedera para infestarla (Quispe, 1983).
- **Gravedad.** Conforme las hembras OP comienzan a fijarse de los cladodios, los caminadores caen por la fuerza de la gravedad sobre nuevos cladodios colocados por debajo a propósito para que se infesten. Este es el método adoptado en la producción de invernadero en México para producción intensiva de grana (Escalante, 2013). Gareca (1993) también describió una variante del sistema de gravedad; se coloca una charola con malla con hembras adultas OP sobre cladodios, las cuales se mecen horizontalmente dos veces al día, para provocar que los caminadores caigan sobre ellos.
- **Recipientes de papel.** Es el método más simple, se usa un pedazo de papel para fabricar un recipiente



pequeño (de 8 cm de longitud) donde se colocan hembras OP (Tellez, 1911), este es sujetado con espinas a la planta hospedera para facilitar la infestación (**Figura 4b**).

Cosecha

La cosecha es un proceso delicado, que implica la separación cuidadosa de la hembra de la planta hospedera cuando va a iniciar la oviposición, evitando dañarlas. Existen varios métodos para cosechar cochinilla, que varían dependiendo del método de cría (a cielo abierto o bajo cubierta) y del tipo de planta hospedera (espinosa o sin espinas).

A cielo abierto

En la región andina de Perú y Bolivia, existen muchos instrumentos hechos de palos de madera (de 60 a 150 cm de largo) que sostienen cucharas, cepillos, o tiras metálicas atadas en la punta para facilitar la recolecta de cochinilla (**Figura 4c**). Las cucharas y cepillos son usadas en plantas sin espinas y las tiras metálicas sobre plantas espinosas. En la costa sur de Perú y en Chile, la cochinilla es cosechada de plantas sin espinas por medio de cepillos sin el mango de madera. En Chile y Sudáfrica, se usa el método de aire presurizado para la cosecha de cochinilla de plantas con espina (Brutsch y Zimmerman, 1993). En las Islas Canarias la cochinilla se cosecha en noviembre, después de 3 meses de la infestación, usando una herramienta similar a una cuchara larga denominada "milana".

Durante la cosecha, los insectos colectados caen en bolsas hechas de algodón, las cuales colocadas sobre charolas de madera, metal o arcilla, teniendo cuidado de evitar el apelmazado, ya que puede dañar los insectos frescos.

Bajo cubierta

En México, la cosecha de cochinilla tiene lugar aproximadamente 3 meses después de la infestación, sin embargo esta puede ser llevada a cabo en cualquier época del año, usando varios instrumentos; mallas, cucharas metálicas, cepillos, raspadores de plástico con mango. La selección del instrumento depende de diferentes factores; método de cría, tamaño de la unidad de producción, y el tipo de nopal, plantas con o sin espinas a aun pubescentes. En aquellos sitios donde la cría de grana es una actividad reciente, puede ser necesario desarrollar nuevas técnicas e instrumentos para la cosecha (Vigueras y Portillo, 2014).

Actividades postcosecha

Las actividades postcosecha incluyen la muerte (o sacrificio como se denomina en México) y secado del insecto

(Santibáñez, 1990), así como la selección. Existen varios métodos de sacrificio del insecto:

- Inmersión en agua hirviendo (Alzate y Ramirez, 1777);
- Sofocación con vapor;
- Congelación a temperaturas bajo 0°C, (técnica en experimentación);
- Sofocación con hexano;
- Asfixia en recipientes herméticos, y
- Aire caliente, dentro de estufas, o recipientes de barro (Tellez, 1911), o por radiación solar (temperaturas alrededor de 20°C).

Para secar la cochinilla se usan secadores solares y estufas, Así como insolación directa y en la sombra, en este caso se requiere que el sitio de secado este completamente seco. El proceso de selección implica la separación de machos, cochinillas inmaduras, mudas, cera y otros elementos diferentes a las adultas. La selección debe de considerar el tamaño del insecto, ya que los más grandes contienen más pigmento; sin embargo el objetivo final es obtener grana con un alto contenido de ácido carminico. La grana preferente reúne las siguientes características;

- >22% de ácido carminico,
- Tamaño de malla 14 (>1.295 cm); y
- <1% de impurezas.

La cochinilla que reúne estas especificaciones tiene un mercado amplio, de otro modo no existe virtualmente ninguna demanda y el precio es bajo. El precio de la cochinilla está directamente relacionado con el porcentaje de ácido carminico (1% = 1 US\$), aunque este precio puede variar dependiendo del mercado.

ECOLOGIA

Cualquier organismo está en una interacción balanceada con factores de su ambiente nativo, si se traslada a otro lugar (área no nativa), este equilibrio puede romperse. La pérdida del equilibrio natural tiene consecuencias, una de las cuales puede ser la transformación hacia organismo invasivo. El control biológico es la herramienta más común para reducir los efectos de este fenómeno, controlando el organismo foráneo hasta que se transforma en no invasivo o naturalizado (Shine *et al.*, 2000).

Dada la utilidad para la especie humana, las Opuntias y *Dactilopius* que son de interés comercial particular, son introducidos frecuentemente en nuevas zonas Neotropicales y Neoárticas, así ahora se encuentran en varias regiones del África tropical, Australasia, Palearticas y Orientales (Anderson, 2001; Bravo Hollis, 1978; Majure *et al.*, 2012b). Estos movimientos han conducido a la aparición de nuevos problemas de maleza y plagas,



Figura 4:
 a) Microtuneles;
 b) método de infestación del recipiente de papel;
 c) uso de instrumentos de madera para colectar cochinilla;
 d) especies invasoras de cochinilla



como las plantaciones de nopal de Brasil, España, y otros países de la cuenca del Mediterráneo (Portillo, 2009; Vasconcelos *et al.*, 2009). Las especies de cochinilla han sido consideradas invasoras ya sean la especie fina o domesticada (*D. coccus*) en Etiopia (Belay, 2015) (**Figura 4d**). Aun cuando a nivel global esta especie se considera un insecto útil. Algunas especies de *Dactilopius* han sido - y aun lo son- usadas como agentes de control biológico de varias especies de *Opuntia* que son consideradas también invasoras (**Tabla 4**). Existe el riesgo de que surgirán nuevos problemas con la cochinilla y las variedades cultivadas de nopal.

D. coccus muestra adaptación y selectividad por especies particulares de *Opuntia* (Portillo *et al.*, 1992), un comportamiento similar se ha reportado para *D. opuntiae* (Volchansky *et al.*, 1999); Githure *et al.*, 1999). Las variedades de nopal que se han introducido desde México a otros países, son consideradas como factores bióticos foráneos desde el punto de vista ecológico en áreas no nativas.

Aun cuando se ha considerado invasivo, el nopal se ha convertido en un elemento útil, conocido y apreciado por los habitantes locales. Es utilizado de muchas maneras estableciendo relaciones etnobotánicas notables en muchas comunidades alrededor del mundo. Sin embargo, la realidad es que pueden aparecer nuevos factores bióticos, o amenazas potenciales al nopal que deben ser encarados. La cochinilla silvestre (*D. opuntiae*) representa una amenaza potencial al nopal cultivado, así como la palomilla del nopal (*Cactoblastis cactorum*), la mancha negra (*Pseudocercospora opuntiae*) (**Figura 5a**). Para contrarrestar los riesgos de nuevas infestaciones de la cochinilla silvestre se deben establecer barreras sanitarias más estrictas, estas se han registrado recientemente en Israel, Líbano y Marruecos. La cochinilla silvestre es una plaga insidiosa y altamente agresiva al nopal, como se ha demostrado en Brasil (**Figura 5b**). Para mantener las invasiones bajo control son necesarios esfuerzos continuos, con esta finalidad los autores colectan información continuamente.



e



f

Figura 5
a) Mancha negra
(*Cercospora opuntiae*);
b) cochinilla silvestre

TABLA 4 Especies de *Dactylopius* usadas para el control de Opuntias invasivas

Especies de cochinilla	Especies de <i>Opuntia</i>	País	Fuente
<i>D. austrinus</i>	<i>O. aurantiaca</i> Guilles ex Lindley	Australia 1970; Sudáfrica 1979	Moran and Cabby (1979)
<i>D. ceylonicus</i>	<i>O. vulgaris</i> Miller	Sri Lanka 1863	Volchansky <i>et al.</i> (1999)
<i>D. opuntiae</i>	<i>O. ficus-indica</i>	Sudáfrica 1938	Moran y Zimmermann (1984a)
<i>D. opuntiae</i>	<i>O. stricta</i> Haworth	Australia 1921	Hoffmann <i>et al.</i> (2002)
<i>D. opuntiae</i>	<i>O. ficus-indica</i>	Brazil 2001 ^a	Batista <i>et al.</i> (2009)

^a En Brasil la introducción de *D. opuntia* no era para control biológico, ahora se ha convertido en una especie invasora, destruyendo miles de hectáreas de plantaciones de nopal.



Enfermedades del nopal

Giovanni Granata,^a Roberto Faedda^a y María Judith Ochoa^b

^a Departamento de Agricultura, Alimentación y Ambiente. Universidad de Catania. Italia

^b Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina



INTRODUCCIÓN

Similar a otros cultivos, el nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill) sufre de varias enfermedades bióticas y abióticas, su importancia depende del destino del producto. La información precisa sobre la etiología y la epidemiología de los patógenos es escasa, y la literatura científica no cubre adecuadamente la distribución geográfica ni el impacto económico de muchas enfermedades del nopal. Aun cuando es cierto que la mayoría de las enfermedades infecciosas son causadas por hongos, un menor número de bacterias, fitoplasmas y virus son reportados como patógenos.

Debido al clima seco de las regiones donde se cultiva el nopal en el mundo, las enfermedades se tornan problemáticas únicamente durante ciertos periodos cuando las condiciones se tornan favorables. Sin embargo, actualmente con la expansión del cultivo del nopal, las plantaciones más densas y el cambio climático pueden contribuir a que la incidencia sea mayor así como la severidad de las enfermedades, y la posible emergencia de enfermedades nuevas o inusuales. La detección temprana, la identificación precisa y el monitoreo estricto de las enfermedades en los campos y en el material de propagación son esenciales para prevenir su difusión.

Este capítulo provee descripciones concisas de las enfermedades más comunes que afectan al nopal y las recomendaciones para su control.

ENFERMEDADES FUNGOSAS

Mancha negra

Agente causal: *Pseudocercospora opuntiae* Ayala-Escobar, Braun & Crous.

Hospederos: *Opuntia* spp., *Nopalea* spp.

Distribución geográfica: Bolivia, Brasil, México, Perú.

Síntomas y señales: los primeros síntomas son decoloración de la cutícula en forma de mancha circular, que se torna transparente y de apariencia aceitosa, el área central café incrementa en tamaño. Posteriormente el tejido del cladodio presenta un color café claro en los márgenes de la mancha el cual cambia a café oscuro, presentando colapso del tejido. Los tejidos afectados se tornan negros, los conidióforos y conidios se observan en forma de protuberancias (**Figura 1**).

Finalmente la zona afectada se hunde hasta el otro lado del cladodio. Las lesiones alcanzan un diámetro de 3-4 cm en la zona de la infección. Pueden aparecer diferentes síntomas simultáneamente en el mismo cladodio (Ochoa *et al.*, 2015). Síntomas similares se han asociado con la antracnosis causada por *Colletotrichum gloeosporides* (Penz.) Penz & Sacc. Sin embargo, sobre la base de pruebas de patogenicidad, Quezada Salinas *et al.*, (2006), confirmaron que *C. gloeosporides* no es la causa de la enfermedad de la mancha negra del nopal.

Manejo de la enfermedad: revisar las plantaciones de nopal después de la estación lluviosa para detectar y eliminar los cladodios que muestren las primeras señales de la enfermedad. Adoptar poda preventiva para favorecer buena ventilación. Aplicar fungicidas de cobre justo antes del comienzo de la estación de lluvias.

Pudrición del cladodio y de la fruta

Agente causal: *Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Giff. & Maubl. (teleomorph: *Botryosphaeria rhodina* Berk. & M.A. Curtis, Arx).

Sin.: *Botryodiplodia theobromae* (Pat.).

Rango de hospederos: Más de 500, incluyendo humanos.

Distribución geográfica: Brasil, Egipto, Italia, México, Sudáfrica, EUA.

Síntomas y señales: áreas negruzcas redondeadas, de 15-50 mm de diámetro que aparecen en los cladodios, expulsando un exudado gomoso del margen de la lesión. Los picnidios son frecuentemente evidentes sobre la superficie del área infectada. Probablemente la enfermedad ha sido reportada como cáncer gomoso de los cladodios (**Figura 2**). En Linosa Italia el agente causal se atribuyó a *Botryosphaeria ribis* (Sin. *Dothiorella ribis*) (Somma *et al.*, 1973).

Manejo de la enfermedad: evitar causar heridas, remover y destruir especímenes enfermos. Aplicar fungicidas (tiabendazol y tiofanato-metil) que son efectivos para reducir la incidencia de la enfermedad.

Pudrición seca por *Alternaria*

Agente causal: *Alternaria* spp.

Rango de hospederos: altamente polífaga.

Distribución geográfica: Argentina, Italia, Brasil, Egipto, México, Sudáfrica.

Síntomas y signos: los primeros síntomas son áreas cloróticas circulares alrededor de las espinas o heridas

**Figura 1**

Mancha negra del nopal

**Figura 2**

Cáncer gomoso. (Isla de Linosa, Italia).

sobre los cladodios y frutos, los cuales después se tornan oscuros y necróticos (**Figura 3**) los sitios de penetración son generalmente las espinas, pero pueden también ser las heridas en la cutícula causadas por granizo. En Sudáfrica se aislaron diferentes especies de *Alternaria*, de cladodios con síntomas de pudrición seca (Swart y Kriel, 2002; Swart y Swart, 2002; Ammar *et al.*, 2004; Souza *et al.*, 2010). En Italia *Alternaria alternata* causa la mancha dorada (**Figura 4**) produciendo manchas oscuras en el centro y amarillo dorado alrededor de los bordes (Granata y Sidoti, 1997). La misma enfermedad es conocida como mancha del oro o secamiento de la penca en México (Gutiérrez, 1992). *A. alternata* también causa deterioro postcosecha de la fruta. Los síntomas son una pudrición superficial seca de la cascara, de color negro (**Figura 5**). Generalmente las lesiones, presentan márgenes irregulares localizados en la parte central del fruto y la cascara deteriorada puede ser removida (Faedda *et al.*, 2015b).

Manejo de la enfermedad: Saspersiones de fungicidas a base de cobre, mancozeb e iprodione, para un control efectivo de la enfermedad, especialmente después de las granizadas. aplicar un tratamiento de agua caliente para un control eficiente en postcosecha.

Pudrición de raíces y tallos por *Armillaria*

Agente causal: *Armillaria mellea* (Vahl) P. Kumm.

Rango de hospederos: Altamente polífaga.

Distribución geográfica: Italia y Estados Unidos de América (EUA).

Síntomas y signos: la pudrición de raíces y tallos es causada por *Armillaria mellea*, un hongo basidiomicetaceo que coloniza el tronco y las raíces principales de la planta y produce un micelio blanco con cordones de hifas, llamadas rizomorfos, que dispersan los tejidos infectados contaminando las plantas vecinas. Las plantas de nopal infectadas reducen el turgor de sus tejidos y muestran clorosis como resultado de la desorganización del floema y la alteración del flujo de minerales y agua. Los frutos que crecen en plantas infectadas no alcanzan la madurez completa y permanecen momificados en el cladodio. Los síntomas de pudrición basad pueden ser observados con la liberación de un exudado viscoso. Se pueden encontrar los abanicos de micelio e hifas característicos debajo de la superficie de las lesiones. Las porciones podridas de los troncos presentan un borde rojizo brillante el cual se extiende por encima de la línea del suelo. La enfermedad puede afectar las raíces principales (Raabe y Alcon, 1968; Magnano di San Lio and Tirrò, 1983).

Figura 3

Pudrición seca por *Alternaria* (Túnez)

Figura 4

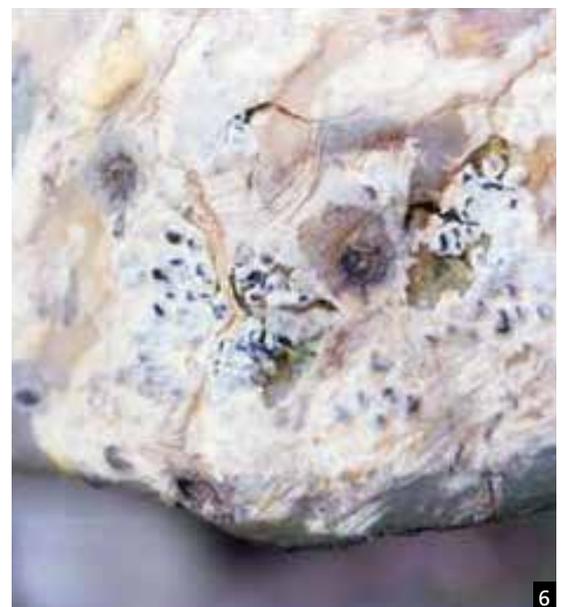
Mancha de oro (Italia)

Figura 5

Pudrición de fruto por *Alternaria* (Italia)

Figura 6

Pudrición algodonosa (Perú)



Manejo de la enfermedad: Dado que *Armillaria* permanece frecuentemente en el suelo los residuos de cultivos previos inevitablemente infectan los nuevos cultivos, es recomendable no plantar en suelos infectados por este hongo durante 2-3 años y remover las fuentes inóculo (raíces de cultivos previos). El control químico efectivo de la enfermedad todavía no está disponible.

Pudrición algodonosa

Agente causal: *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib) de Bary.

Rango de hospederos: polífaga.

Distribución geográfica: Chile y México.

Síntomas y señales: El hongo causa una pudrición algodonosa en los cladodios (**Figura 6**), inicialmente los cladodios infectados se tornan decolorados, seguido por reblandecimiento de la cutícula. Más tarde se tornan cafés, se desprenden hojuelas y se cubren de una masa algodonosa blanca. Aparecen



Figura 7
Pudrición de la base del tronco por *Phytophthora* (Italia).



Figura 8
Moho gris (Italia)

numerosos esclerocios de los tejidos deteriorados. (G. Granata comunicación personal).

Manejo de la enfermedad: La remoción y destrucción de los cladodios infectados es de importancia primaria ya que previene que los esclerocios toquen el suelo donde pueden permanecer vivos por muchos años.

Roya

Agente causal: *Aecidium opuntiae* Magn.

Sin.: *Puccinia opuntiae* (Magnus) Arthur & Holw.

Rango de hospederos: *Opuntia* spp., *Bouteloua simplex* Lag.

Distribución geográfica: Bolivia, Italia, Perú.

Síntomas y signos: conocida como "roya" en Sudamérica, esta enfermedad es causada por *Puccinia opuntiae*, la cual produce pústulas amarillo-anaranjadas sobre la superficie de los cladodios y frutas. Conforme la lesión se seca, se desarrolla una depresión en los cladodios. Una sintomatología similar fue descrita por Goldanich (1964) para una roya costrosa y el agente causal fue atribuido a *Phyllosticta opuntiae* Sacc. & Speg.

Manejo de la enfermedad: Remover y enterrar los cladodios infectados.

Pudrición escamosa

Agente causal: *Scytalidium lignicola* Pesante.

Rango de hospederos: *Auricularia polytricha*, *Citrus paradisi*, *Mangifera indica*, *Manihot esculenta*, *Vanilla fragrans*, humanos y animales..

Geographical distribution: Brasil.

Síntomas y signos: La enfermedad esta difundida en nopaleras para forraje de la región este del Brasil. Los síntomas inician con una pudrición seca que evoluciona hacia una apariencia escamosa en la base de los cladodios (Souza *et al.*, 2010). Los tejidos infectados excretan abundante exudado amarillento. Este hongo polífago es un patógeno que causa infecciones de la piel, uñas y pelo en humanos.

Manejo de la enfermedad: actualmente, no

existe investigación que determine las condiciones optimas para la expresión de la enfermedad. La remoción de plantas infectadas reduce la cantidad de inóculo para infectar plantas vecinas.

Pudrición de raíces por *Phytophthora*

Agente causal: *Phytophthora nicotianae* Breda de Haan.

Rango de hospederos El patógeno infecta plantas de aproximadamente 90 diferentes familias y aislamientos diferentes tienen distintos rangos de hospederos.

Distribución geográfica: Italia.

Síntomas y señales: *Phytophthora nicotianae* es el agente causal de la pudrición de la base de las plantas de nopal tunero en Italia (Cacciola y Magnano di San Lio, 1988). Los síntomas más típicos incluyen los exudados gomosos expelidos de la parte baja del tronco. Las plantas enfermas presentan lesiones acuosas con márgenes café irregulares en la superficie de la base del tronco y pudrición suave de los tejidos internos que se tornan de café o rojizos. Las plantas afectadas se notan cloróticas, detienen el crecimiento y los cladodios se marchitan, causando el colapso de la planta (**Figura 7**).

Manejo de la enfermedad: Suelos arcillosos donde el agua se estanca favorecen la presencia de *Phytophthora*. Por esta razón, el nopal debe plantarse en suelos bien drenados para prevenir inundación.

Pythium de la corona y pudrición del tronco

Agente causal: *Pythium aphanidermatum* Edson (Fitzp.).

Rango de hospederos: ampliamente polífago.

Distribución geográfica: México.

Síntomas y signos: Los primeros síntomas son lesiones suaves de color café al nivel del suelo ñ las lesiones gradualmente alcanzan la parte superior de los cladodios y se extienden hacia arriba al siguiente cladodio. Los cladodios podridos están

Figura 9
Pudrición de fruto por
Penicillium



Figura 10
Pudrición suave por
Macrophomina



asociados a raíces podridas. Las plantas enfermas finalmente colapsan, las plantas grandes colapsan más pronto que las pequeñas (Rodríguez Alvarado *et al.*, 2001).

Manejo de la enfermedad: Evitar el exceso de humedad en el suelo y mejorar el drenaje.

Pudrición de raíces por *Fusarium*

Agente causal: *Fusarium oxysporum* f. sp. *opuntiarum* (Pettinari) W.L. Gordon.

Rango de hospederos: *Echinocactus grusoni*, *Schlumbergera truncate*.

Distribución geográfica: Brasil e Italia

Síntomas y señales: Los tejidos afectados de las plantas enfermas presentan pudriciones de raíz con coloración rojo intenso. Si la enfermedad es severa, las plantas infectadas pueden desarrollar otros síntomas incluyendo enanismo y marchitez (Pettinari, 1951).

Manejo de la enfermedad: Plantar en suelos con buen drenaje y reducir la compactación del suelo para reducir las condiciones favorables a la infección por especies de *Fusarium*.

Moho gris

Agente causal: *Botrytis cinerea* Pers. (teleomorph: *Botryotinia fuckeliana* [de Bary] Whetzel).

Rango de hospederos: altamente polífaga.

Distribución geográfica: Italia.

Síntomas y signos: EL patógeno penetra a través de heridas que ocurren cuando el fruto es separado de los cladodios. El área infectada del fruto es usualmente de forma circular y se torna gris oscuro; los tejidos internos se suavizan y deterioran (Figura 8) (G. Granata, comunicacion personal).

Manejo de la enfermedad: Evitar heridas durante la cosecha y el empaque.

Pudrición de fruta por *Penicillium*

Agente causal: *Penicillium* spp.

Rango de hospederos: Altamente polífaga.

Distribución geográfica: Mundial.

Síntomas y signos: *Penicillium* es reconocida como una enfermedad principal en postcosecha de la tuna en muchas áreas productoras del mundo. *Penicillium italicum* Wehmer y *P. digitatum* (Pers.) Sacc. Son reportados los principales agentes causales de esta enfermedad (Schirra *et al.*, 1999b). Otras especies de *Penicillium*, incluyendo, *P. citrinum* Thom., *P. expansum* Link (Scherm *et al.*, 2003; Oliveri *et al.*, 2007) y **P. polonicum** K.M. Zalesky (Faedda *et al.*, 2015a) han sido reportados en tunas de Italia (Figura 9). Los daños físicos a la cascara durante la cosecha y el empaque así como el almacenamiento en frío predisponen los frutos del nopal a la infección por este hongo. Los tejidos infectados se tornan de color café, suaves y acuosos. Las lesiones aumentan de tamaño y un micelio blanco emerge de las grietas de la cascara deteriorada mientras que masas de esporas azul-verdosas aparecen sobre la superficie de la cascara sobre las lesiones.

Manejo de la enfermedad: el control de la enfermedad incluye la recolección y manejo postcosecha cuidadosos para reducir danos a la cascara. En el empaque y almacén, la implementación de buenas prácticas sanitarias que previenen la esporulación y reducen la cantidad de inoculo.

Pudrición suave por *Macrophomina*

Agente causal: *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Gold.

Rango de hospederos: Polífago con más de 500 plantas hospederas.

Distribución geográfica: Italia.

Síntomas y signos: Los síntomas comienzan con una pudrición suave de color café en la parte proximal extendiéndose posteriormente al fruto completo en postcosecha. (Faedda *et al.*, 2015b). en etapas avanzadas, el área infectada es cubierta por masas de micelio (Figura 10). *Macrophomina*

ha sido reportada también en Brasil y México, causando la pudrición carbonosa del nopal forrajero (Oliveira *et al.*, 2003; Méndez Gallegos *et al.*, 2009).

Manejo de la enfermedad: A la fecha, no se ha realizado investigación sobre su control.

Otros hongos

Además de los discutidos previamente, se han encontrado otros hongos en cladodios y frutos de las plantas de nopal. Sin embargo, muchos de ellos son saprofitos o patógenos secundarios, frecuentemente recuperados de plantas de nopal debilitadas, y su papel principal como patógenos no ha sido probado claramente. Los hongos más comunes se describen a continuación:

- *Aspergillus niger* - encontrado en Egipto asociado a cladodios y frutas podridas (Ammar *et al.*, 2004).
- *Candida boidimi* - asociada con pudrición suave de los cladodios y frutas en Italia (Granata y Varvaro, 1990).
- *Capnodium* spp. y otros hongos - causa fumagina en México - (Méndez Gallegos *et al.*, 2009; Mondragón Jacobo *et al.*, 2012).
- *Cercospora* sp. - rereportada en Bolivia y Perú causando manchas circulares necróticas en cladodios (Granata y Sidoti, 2002).
- *Colletotrichum gloeosporioides* - encontrada en Brasil, Korea y México, causando antracnosis en cladodios. Los síntomas consisten en manchas café oscuro comenzando usualmente en los márgenes de la penca y extendiéndose sobre el cladodio completo (Osada y Càrcamo, 1991; Kim *et al.*, 2000; Souza *et al.*, 2010).
- *Fusarium species* - Encontradas en nopal de muchas partes del mundo, incluyendo Brasil, Egipto, Sudáfrica y México (Swart y Kriel, 2002; Ammar *et al.*, 2004; Swart *et al.*, 2009; Souza *et al.*, 2010):
 - *Fusarium oxysporum*, *F. proliferatum* and *F. sporotrichoides* - asociados a lesiones cloróticas secas de los cladodios.
 - *F. solani* - reportada como agente causal de la pudrición de la punta.
 - *F. lunatum* - reportada como agente causal de las manchas circulares de los cladodios.
- *Cladosporium* sp. - Asociados a manchas de los cladodios en Mississippi, EUA (Msucars. Pers. comm.)
- *Curvularia lunata* - reportada en Brasil y México causando síntomas de manchas circulares de los cladodios (Souza *et al.*, 2010; Flores Flores *et al.*, 2013).
- *Cylindrocarpon* sp. - encontrada en Sudáfrica asociada con necrosis de los cladodios (Swart y Swart, 2002).
- *Hendersonia opuntiae* - causa la enfermedad conocida como "resequedad" o "quemadura de sol". Los síntomas consisten de manchas que al inicio están

localizadas, después crecen hasta que el cladodio completo se torna rojizo café. El centro del área enferma es de color grisáceo café y agrietado (Horst, 2013).

- *Mycosphaerella* sp. - causa manchas necróticas en cladodios en Sudamérica. La enfermedad es conocida como mancha plateada en México (Granata, 1995).
- *Phoma* sp. - encontrada en Argentina causando manchas necróticas en cladodios, (Granata, 1995).
- *Pleospora* sp. - causa manchas necróticas en cladodios (Granata, 1995).
- *Pollaccia* sp. - reportada como la causa de pudrición de cladodios en nopales sin espinas en la región de Alagoas (Noreste de Brasil) (Franco y Ponte, 1980).
- *Rhizopus* sp. - encontrada en Brasil y Sudáfrica (Swart y Swart 2002; Souza *et al.*, 2010).

ENFERMEDADES BACTERIANAS

Pudrición suave negra

Agente causal: *Erwinia carotovora* subsp. *Carotovora*.

Rango de hospederos: Polífaga.

Distribución geográfica: Argentina y Italia.

Síntomas: En la primavera los cladodios presentan manchas acuosas que se tornan café y coalescen (**Figura 11**) los tejidos externos se tornan secos y frecuentemente se agrietan; los tejidos internos toman un color café a casi negro. Estos síntomas también pueden ser observados en frutos (Varvaro *et al.*, 1993; Saad *et al.*, 1998).

Manejo de la enfermedad: remoción y destrucción de los segmentos infectados. Asperjar inmediatamente con compuestos de cobre en situaciones de alto riesgo, tales como viento intenso o granizo.

Agalla de la corona

Agente causal: *Rhizobium radiobacter* (Previamente conocido como *Agrobacterium tumefaciens*).

Rango de hospederos: altamente polífaga reportada en más de 90 familias de plantas.

Distribución geográfica: México.

Síntomas: Crecimiento tumoral (agallas) formado en la base del tallo. El color de la agalla varía de café a negro y se abre con la madurez. El tumor en la base del tallo varía en tamaño con un diámetro ≥ 15 cm (Gutiérrez, 1992).

Manejo de la enfermedad: No plantar variedades susceptibles en suelos infestados con este patógeno. El tratamiento preventivo de los cladodios para plantación con el organismo de control biológico *A. radiobacter* es relativamente barato y efectivo para evitar el desarrollo de la agalla de la corona en huertas comerciales.



FITOPLASMAS Y ENFERMEDADES VIRALES

Una de las enfermedades más serias del nopal reportada en México es conocida como engrosamiento de cladodios o macho (Pimienta Barrios, 1990). Los síntomas típicos de la enfermedad -que se asume es causada por un fitoplasma- es un enanismo severo mostrado en cladodios, flores y frutos. La enfermedad también se ha detectado en California (EUA) donde apareció a mediados de los ochentas y en Sudamérica (Felker *et al.*, 2010). En Italia los síntomas de malformación, enanismo y falta de flores, frutas y producción de espinas sobre plantas de nopal han sido atribuidos a una raza de fitoplasmas que corresponde al subgrupo 16rII-C (**Figura 12**) (Granata *et al.*, 2006; Tesstori *et al.*, 2006).

Bertaccini *et al.*, (2007) identificaron dos fitoplasmas diferentes (16SrI-B y 16SrV-A) asociados a muestras de nopal provenientes de California afectadas por la enfermedad del engrosamiento de cladodios.

Los síntomas de malformación de cladodios, proliferación de yemas, engrosamiento y "acorazonamiento" de cladodios con recimiento retardado y amarillamiento de cladodios fueron observados en la región de San Martín de las Pirámides (Noreste del estado de México) y asociados con fitoplasmas del subgrupo 16srII (Hernández Pérez *et al.*, 2009

a). Posteriormente, Fucikowski Zak *et al.*, reportaron síntomas de fitplasmosis en plantas de nopal en la región de Nopaltepec (Estado de México) asociados a la raza 16Sr1 (raza amarilla de Aster, *Candidatus fitoplasmas asteris*). Recientemente en la misma región se observaron síntomas de deformación y engrosamiento de cladodios, mosaico, amarillamiento, proliferación y deformación de frutos en plantas de nopal, pero el agente causal fue atribuido al viroide mexicano 16SrXIII fitoplasma (Suaste Dzul *et al.*, 2012b).

Felker *et al.*, (2010) reportaron que en California el engrosamiento de cladodios es causado por un virus del tabaco (bushy top virus) y que podría ser posible que los síntomas observados en México, Sudáfrica e Italia son inducidos por el mismo virus. Resultados similares fueron obtenidos por Suaste Dzul *et al.*, (2012a), quienes demostraron la presencia de un virus en muestras de nopal provenientes de Nopaltepec, mostrando el engrosamiento de cladodios y el síndrome del mosaico de los cladodios. Por lo tanto

Figura 11
Pudrición suave negra
(Italia).

Figura 12
Planta con
fitoplasmas (Italia).



la co-infección entre el fitoplasma y el virus han sido comprobados en este síndrome.

Las enfermedades virales y fitoplasmicas de este cultivo son difíciles de controlar debido a la falta de estudios científicos sobre la susceptibilidad de los cultivares y los insectos vectores.

DESORDENES ABIOTICOS

Existe muy poca literatura científica sobre las enfermedades no infecciosas del nopal. a continuación se describen los desórdenes más comunes que ocurren ocasionalmente en las zonas productoras.

Daño por heladas

El daño debido a bajas temperaturas -menores a -5°C- puede tener efectos drásticos sobre la planta completa y afectar solamente una parte de ella, reduciendo el rendimiento o la calidad del producto. La susceptibilidad al frío depende de la edad y estado fisiológicos de la planta y del cultivar. Las frutas que están en maduración son las más sensibles a heladas, los daños consisten de manchas necróticas sobre la superficie de la cascara (Figura 13).



Daño por granizo

El grado del daño causado por granizo depende de la duración y la intensidad de la tormenta, así como de la etapa de desarrollo de la planta. El granizo resulta en heridas en el punto de impacto, cladodios jóvenes y aun cladodios maduros pueden ser perforados por el impacto del granizo (Figura 14). Dado que los cladodios jóvenes proveen sitios de entrada para bacterias y hongos en la planta, el tratamiento con fungicidas protectores como el cobre puede prevenir las infecciones. Los cladodios con daño severo así como las frutas deben ser podados tan pronto como sea posible.

Daño de herbicida

Los síntomas de toxicidad por herbicidas varían de acuerdo al producto aplicado, la concentración y los factores ambientales (Figura 15).

Agrietamiento de frutas

Aunque la causa exacta no es conocida, el agrietado de frutas ocurre cuando las plantas absorben agua - riego o lluvia - después de un periodo prolongado de sequía, que causa la expansión rápida del fruto rompiendo la cascara cerca de la base del fruto (Figura 16).



Figura 13
Daño por heladas (Italia)

Figura 14
Daño por granizo (Italia)



Figura 15
Daño por glifosato (Italia)



Figura 16
Agrietado de fruta (Italia)



Insectos plaga del nopal

Jaime Mena Covarrubias

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias



INTRODUCCIÓN

La familia Cactaceae es un grupo de plantas muy distintivas por sus peculiares características de crecimiento y hábitos, de esta manera han evolucionado naturalmente su propio complejo de insectos. En efecto, más de 160 especies de insectos son dañinos a las plantas de nopal (Dood, 1940; Mann, 1969; Zimmerman y Granata, 2002), aunque no son plagas únicamente del nopal.

Los insectos del nopal se han ajustado en general a las condiciones de las regiones en las cuales sus plantas hospederas se desarrollan. Por ejemplo, la mayoría de las etapas adultas de los insectos, los escarabajos y lepidópteros son activos únicamente en la noche y el desarrollo de sus fases inmaduras lo realizan dentro de los tejidos internos del cladodio, ramas y tallos de los nopales, de hecho el 75% de los insectos que se alimentan del nopal lo hacen internamente (Zimmermann y Granata, 2002). Estos insectos se han adaptado también a la estructura y hábitos de las plantas de nopal, las

chinchas y los lepidópteros a menudo depositan sus huevecillos en las espinas de los cladodios de las pantas. Ninguna parte de las plantas de nopal escapa del daño: algunas especies de insectos atacan la raíz, tallos, cladodios o frutos (**Figura 1**).

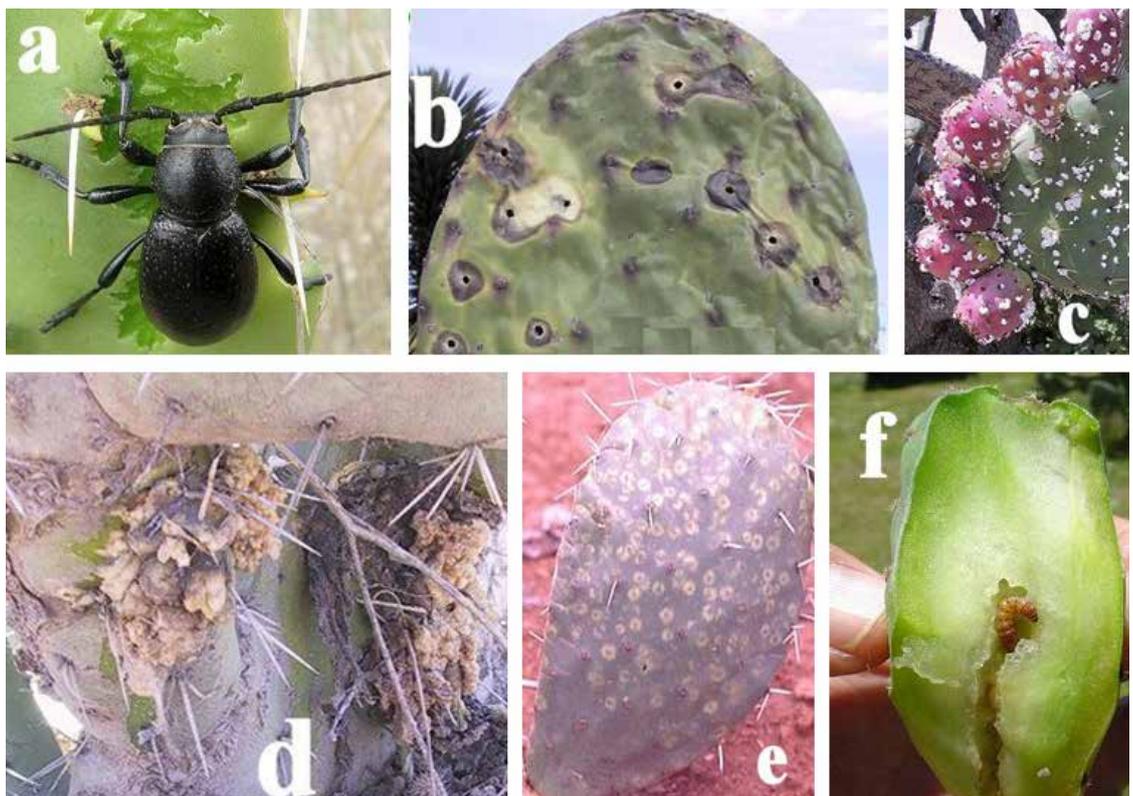
Los daños de los insectos a los huertos de nopal afectan la cantidad y calidad de la cosecha, así como la duración de la vida productiva de las plantas. En general, los insectos que se alimentan de los frutos son de mayor riesgo por las pérdidas en el producto, que aquellos que se alimentan del cladodio. La densidad de insectos también juega un papel importante en la definición del status de una plaga de insectos.

INSECTOS

Este capítulo presenta los principales grupos de insectos que se alimentan de las plantas de nopal en todo el planeta, con enfoque en su identificación, ecología y biología, así como en tácticas del manejo de plagas.

Figura 1

Daños por insectos a las plantas del nopal.
 a) adulto de *Moneilema* en un cladodio tierno,
 b) síntomas de tiro de munición,
 c) infestación de cochinilla silvestre sobre frutos,
 d) exudado gomoso seco en el tallo principal producido por larvas de *Metamasius*,
 e) daño por la chinche gris y
 f) larva de *Metapleura* dentro de una tunas fruit.



Grana cochinilla del nopal (*Dactylopius opuntiae*, Hemiptera: *Dactylopiidae*)

Actualmente, la grana cochinilla del nopal (*Dactylopius opuntiae*) es quizás considerada la plaga más importante de huertos de nopal en todo el mundo. En Brasil, ha infestado 100,000 has de nopal cultivado para producción de forraje, disminuyendo su productividad a un 80% (Lobos *et al.*, 2013); en México, es el mayor factor biótico que limita la producción de tunas (Mena Covarrubias, 2011); y en Sudáfrica es una de las dos plagas más importantes que limitan la producción de forraje y frutos (de Waal *et al.*, 2013b).

D. opuntiae se caracteriza por su reproducción y dimorfismo sexual. La hembra tiene un ciclo de vida con cuatro etapas (huevecillo, ninfa de primer instar, ninfa de segundo instar, adulto) mientras que el macho tiene un ciclo de con seis etapas (huevecillo, ninfa de primer instar, ninfa de segundo instar, "prepupa", "pupa", adulto). La duración del ciclo de vida depende de muchos factores pero ciertas características son comunes. El huevecillo es rojo y brillante; la incubación puede suceder dentro de la hembra adulta; o los caminadores (ninfa de primer instar) pueden incubar en unos minutos después de que el huevecillo se ha depositado (Flores Hernández *et al.*, 2006). Para las hembras la fase de ninfa puede durar 18.1

días: esto es seguido por la fase de preoviposición, durando 18.8 días; y finalmente la hembra ocupa 22 días en la fase de oviposición. En promedio una hembra deposita 131 huevecillos (el rango es de 62 - 617) (Flores Hernández *et al.*, 2006). Los adultos machos parecen pequeñas moscas con dos filamentos largos. Los machos usualmente vuelan para localizar parejas y son de vida corta. La cochinilla grana del nopal es fácilmente reconocible: grandes masas blancas de cera con textura algodonosa cubren su cuerpo y, cuando se les tritura, escurre un color carmesí debido a los fluidos del cuerpo que contrasta con el color algodonoso (**Figura 2**).

La colonización exitosa de una planta de nopal depende de la ninfa de primer instar que desarrollará a una hembra, porque son las únicas que tienen patas funcionales (**Figura 2b**). También desarrollan filamentos dorsales largos de cera, que llegan a su máximo cuando el caminador tiene 2-3 días de edad. En preparación para su dispersión, la hembra caminadora escala al ápice del cladodio de la planta y se suelta con la ayuda del viento (Mow *et al.*, 1982).

La grana cochinilla vive en la superficie de las plantas de nopal, usualmente agregada o en colonias compuestas de individuos en varias etapas de desarrollo, y se ubican en la base de las espinas. Todo el daño por alimentación es ocasionado por las hembras y ninfas que succionan la savia del

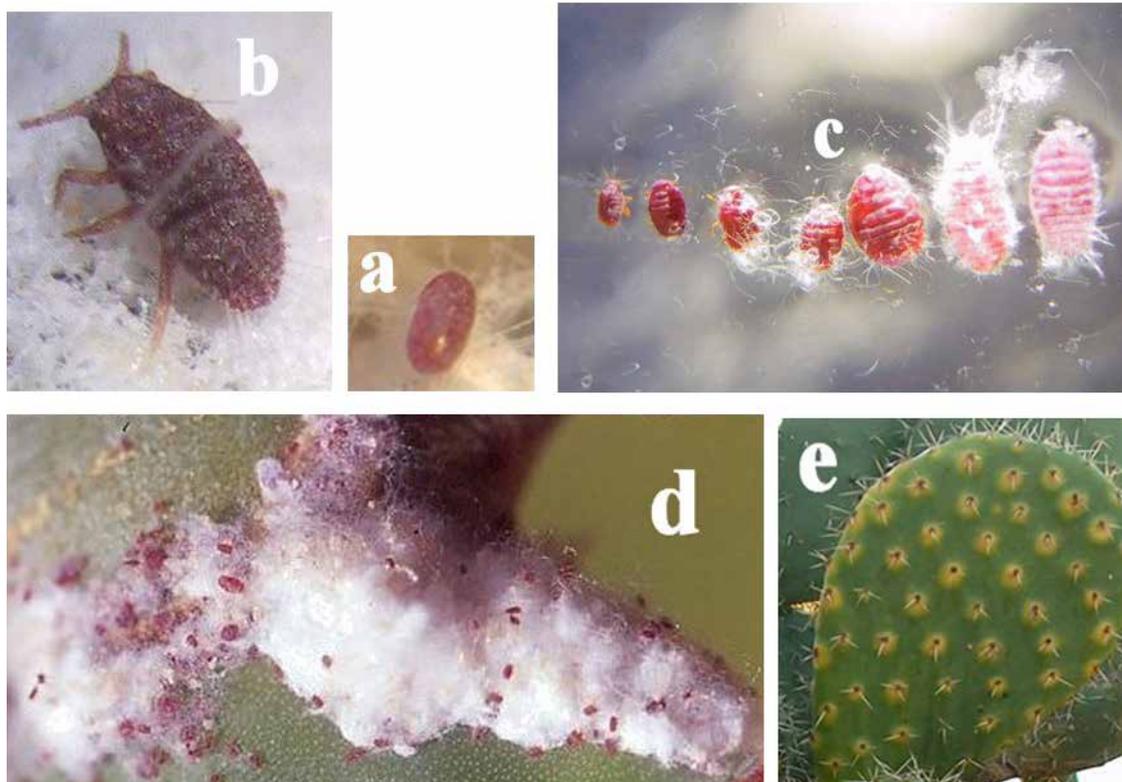


Figure 2
Etapas de desarrollo de la Grana cochinilla silvestre, *Dactylopius opuntiae*:
a) huevecillo,
b) caminador,
c) diferentes estadios de desarrollo de inmaduros,
d) colonia de varias hembras adultas y algunos caminadores sobre ellas, y
e) daños por alimentación en un cladodio.

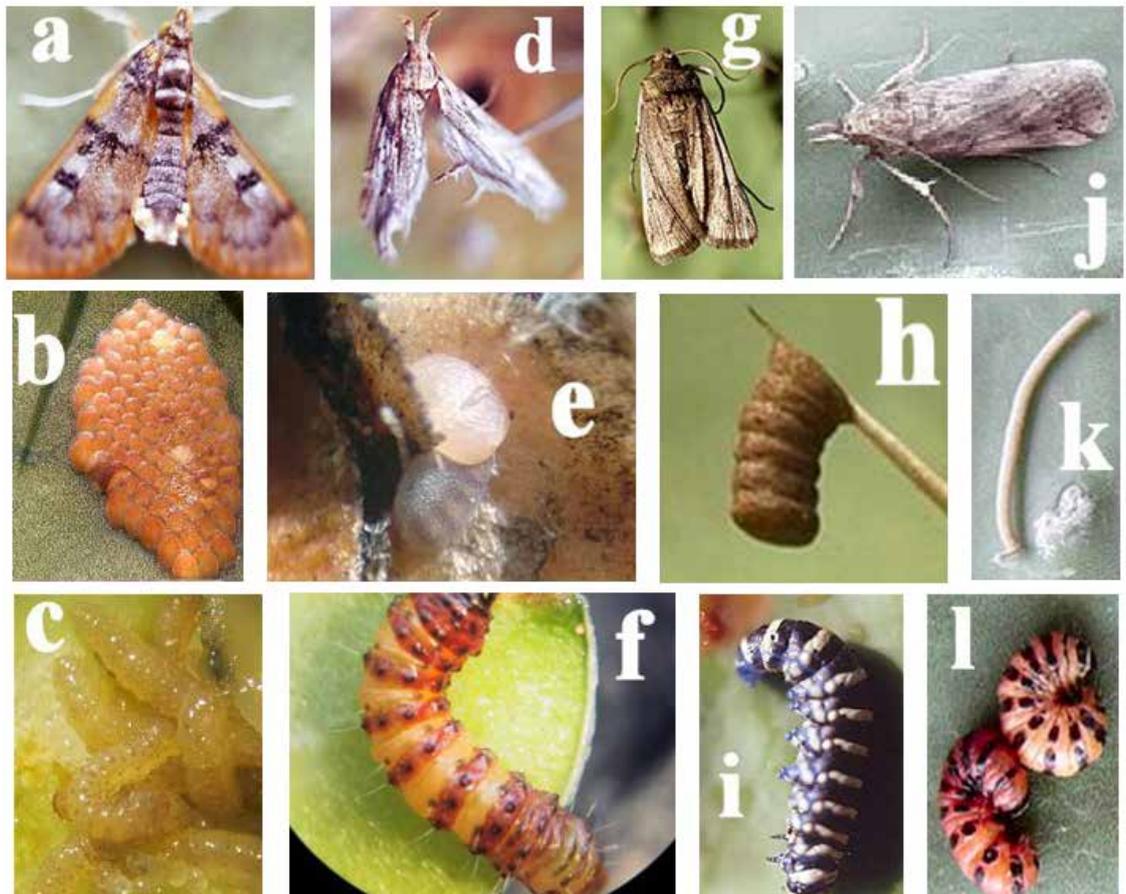
cladodio y de frutos. Dentro de unas pocas semanas de establecimiento en una planta, aparecen áreas amarillas en el cladodio (**Figura 2e**), el cual eventualmente se desprende. Aunque pueden desarrollar nuevos cladodios, estos también caerán si las cochinillas permanecen en las plantas. Dependiendo de la severidad de la infestación, el tronco también puede morir. Los machos de la grana cochinilla no se alimentan como adultos. Para su control, las ninfas de primer instar son las más susceptibles y representan un objetivo más fácil.

Insectos lepidópteros plaga

Las palomillas barrenadoras de la familia Pyralidae son los insectos más abundantes e importantes para el nopal. Esta familia contiene más del 50% de especies de plagas que los escarabajos de antenas largas del nopal y 66% más de especies que los picudos del nopal (Moran, 1980; Zimmermann y Granata, 2002). La palomilla del nopal (*Cactoblastis cactorum*), el gusano cebra del nopal (*Olycella nephelepasa*), el gusano blanco del nopal (*Megastes cyclades*) y el barrenador de las uniones de los cladodios (*Metapleura potosi*) son cuatro de los insectos lepidópteros más importantes que se ali-

mentan de plantas de nopal. *Cactoblastis* posee el mayor riego de daño desde que ha estado presente en Sudamérica y Sudáfrica, amenaza con invadir producciones comerciales de tuna en áreas de Estados Unidos de América y México (Zimmermann y Granata, 2002). Estos cuatro insectos lepidópteros se alimentan en el interior de los cladodios, *Metapleura* también invade los frutos, barrenando desde el cladodio para entrar al fruto y sin dejar rastros de orificios de entrada (Mena Covarrubias, 2013). Las larvas de *Cactoblastis*, *Olycella* y *Metapleura* completamente desarrolladas tienen todos un color brillante en el cuerpo, las larvas de *Cactoblastis* tienen color naranja uniforme o rojo naranja con hileras transversales de manchas negras grandes (**Figura 3i**); las larvas de *Olycella* azul oscuro o negro azulado con bandas blancas transversales (**Figura 3i**); la larva amarillo naranja rojizo de *Metapleura* también tiene hileras transversales de manchas negras pequeñas sobre un color naranja brillante de fondo (**Figura 3f**). Por otro lado, las larvas de *Megastes* tienen un color blanco cremoso, con una mancha café claro a cada lado de los segmentos (**Figura 3c**). Las hembras de *Cactoblastis* y *Olycella* depositan sus huevecillos uno sobre otro para formar lo que se denomina palillo de huevecillos,

Figura 3
Insectos lepidópteros plaga y sus fases de desarrollo.
a) adulto de *Megastes cyclades*,
b) masa de huevecillos,
c) larva;
d) adulto de *Metapleura potosi*,
e) huevecillos,
f) larva;
g) adulto de *Olycella nephelepasa*,
h) masa de huevecillos,
i) larva;
j) adulto de *Cactoblastis cactorum*,
k) palillo de huevecillos y larva.



unidos a las espinas de los cladodios. Cada palillo de huevecillos puede contener entre 35-150 huevecillos de *Cactoblastis* en una sola pieza (Mann, 1969), así que son colocados uno sobre otro como si fueran una espina del cladodio (**Figura 3k**); los palillos de huevecillos de *Olycella* tienen únicamente 1-8 huevecillos y están unidos en ángulo recto a la espina (**Figura 3h**), casi paralelos al cladodio del nopal. Las hembras de *Megastes* depositan masas de 40-90 huevecillos en la superficie del cladodio, con los bordes de los huevecillos traslapándose como si fueran un tejido (**Figura 3b**). Los huevecillos de *Metapleura* son depositados individualmente en grietas, uniones o sobre la superficie de los cladodios del nopal (**Figura 3e**). La etapa adulta de estos cuatro insectos son palomillas con actividad nocturna (**Figura 3a, 3d, 3g, and 3j**).

Las larvas de *Cactoblastis* pueden destruir completamente una planta de nopal de tamaño pequeño a mediano en una sola estación: consumiendo todos los tejidos internos del cladodio, entonces las larvas abandonan el cladodio vacío y se mudan en grupo a los cladodios vecinos intactos. *Cactoblastis* puede tener dos o tres generaciones por año. Las larvas de *Megastes* no son tan móviles y destructivas como las de *Cactoblastis* pero las galerías hechas por sus larvas cada año provocan el colapso de las ramas principales y tallos de las plantas de nopal. *Megastes* tiene solamente una generación por año, pero a veces ataca la misma planta por varios años consecutivos. *Metapleura* representa un alto riesgo para los cultivadores que venden tunas frescas, porque es difícil detectar una fruta infestada; el consumidor se da cuenta hasta que es demasiado tarde, con consecuencias negativas para la relación productor-consumidor. A veces se pueden encontrar hasta 15-20 larvas de *Metapleura* en un solo cladodio, induciendo la pudrición parcial o, si el daño es en las uniones, el cladodio cae al suelo; sin embargo, en la mayoría de los casos, el daño no es significativo. Finalmente, *Olycella* ataca huertos de nopales jóvenes solamente en los primeros tres años; el daño es localizado, y es la única plaga encontrada en excavaciones detrás de los abultamientos como tumores en los cladodios.

El objetivo para el control de todas estas plagas son las larvas recién eclosionadas, pero la ventana de oportunidad varía desde solo un día (*Cactoblastis*) a unos pocos días (otras especies). Los palillos de huevecillos de *Cactoblastis* son el objetivo más fácil: son fáciles de ubicar y permanecen en campo por al menos tres semanas antes de su eclosión (Mann, 1969).

Picudos del nopal (*Curculionidae*)

El picudo del nopal (*Metamasius spinolae*), el picudo del tiro de munición (*Gerstaeckeria* spp.) y el picudo de la areola (*Cylindrocopturus biradiatus*) son tres de los más importantes insectos curculionoides plaga para el nopal. *Metamasius* posee el mayor riesgo debido a que la alimentación por unas cuantas larvas en la base del tallo puede derribar una planta completa; los otros dos géneros se alimentan principalmente en los cladodios.

Los picudos son fácilmente identificados en la fase adulta por su rostrum largo; en *Metamasius*, este es de unos 22 - 25 mm de largo, en *Gerstaeckeria* 0.5 - 0.6 cm y en *Cylindrocopturus* 3 - 3.5 mm. *Metamasius* se caracteriza por sus élitros negros con dos marcas color naranja (**Figura 4a**); *Gerstaeckeria* comúnmente tiene café oscuro con escamas blancas (**Figura 4i**); *Cylindrocopturus* es de color plata con una marca amarilla doblemente cruzada en la parte media del cuerpo (**Figura 4e**). Las larvas de estos curculionidos son como las de gallina ciega pero sin patas y con la cabeza color café (**Figuras 4c, 4g and 4j**).

Metamasius y *Gerstaeckeria* son picudos que no vuelan; los adultos de *Gerstaeckeria* son activos únicamente en la noche. Los picudos de los nopales están presentes potencialmente todo el año, pero su pico de emergencia inicia con la época de lluvias; los picudos del tiro de munición y de las areolas son comunes de marzo a septiembre. La hembra de los picudos del nopal barrena el tejido del cladodio, deposita un huevecillo y lo sella con una mezcla de saliva y alimento regurgitado. Tienen solamente una generación por año, pero los adultos son muy longevos: *Metamasius* ≥ 1 año, *Gerstaeckeria* y *Cylindrocopturus* 4-5 meses (Dodd, 1940; Mann, 1969; Mena Covarrubias, 2013).

La mayor parte del daño a las plantas de nopal es causado por las larvas conforme se alimentan de los tejidos internos y se propician las condiciones para la pudrición, especialmente en el caso de *Metamasius* y, en menor grado, *Gerstaeckeria*. Las larvas de *Metamasius* son bastante móviles viajando desde el tallo hasta la parte baja de las ramas principales para obtener mayor cantidad de alimento. Es común encontrar un solo cladodio, ramas y la planta entera inclinada sobre el suelo; los insectos degradadores incrementan la pudrición de las áreas afectadas (Dodd, 1940, Mann, 1969; Mena Covarrubias, 2012). Los adultos prefieren alimentarse de cladodios jóvenes; *Gerstaeckeria* y *Cylindrocopturus* también los usan para la oviposición y el desarrollo de las larvas, mientras que *Metamasius* prefiere los tallos y cladodios de más edad para sus actividades.

Los adultos son el único estado en que viven externamente y por esta razón es el principal objetivo de control. Sin embargo, la poda puede ser una excelente opción para controlar larvas y pupas de *Gerstaeckeria* y *Cylindrocopturus* durante los meses de invierno.

Escarabajos de antenas largas (*Cerambycidae*)

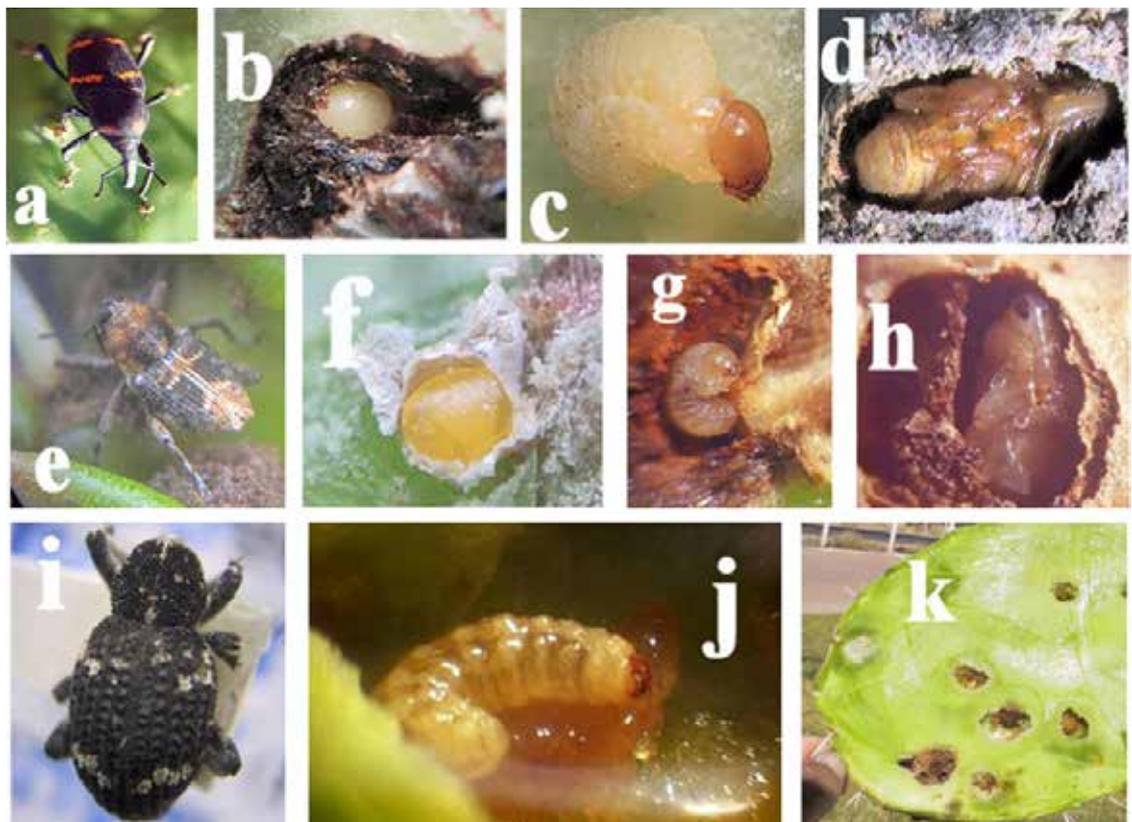
Este grupo está representado por el género *Moneilema* (*M. variolaris* es una de las más comunes en huertos de nopal). Estos pueden ocasionar más daños y solamente dos o tres larvas en la base de un nopal bien desarrollado pueden causar el colapso total de la planta. También se alimentan en la base de plantas jóvenes y tienen el mismo riesgo de daño que los picudos de *Metamasius*. Estos cerambícidos son escarabajos robustos de color negro brillante; los élitros y el protórax a veces presentan marcas blancas irregulares. Su longitud es de 15-25 mm (los machos son más pequeños que las hembras), y las antenas son más largas que la mitad de la longitud del insecto (**Figuras 1a, y 5a**). La larva es blanca y cada segmento está profundamente marcado a lo largo del cuerpo; su longitud se encuentra en el rango de 15 a > 40 mm; la cabeza es negra (**Figura 5a y 5c**).

Los insectos de *Moneilema* son nocturnos y no vuelan; sin embargo en días nublados, estos escarabajos son también activos en la mañana. Los adultos viven por varios meses y están presentes en los meses de marzo a noviembre. Los huevecillos son depositados de forma solitaria y adheridos a la superficie de segmentos maduros, en grietas, contra el tallo o justo debajo del nivel del suelo (Mann, 1969). Se presentan una o dos generaciones por año; en el caso de dos generaciones por año, la emergencia en primavera es mucho mayor que la de otoño (Dodd, 1940; Mann, 1969).

Las larvas infestan el tallo principal y las uniones de mayor edad en el nopal, construyendo galerías que son rellenadas con exudaciones copiosas que pronto se tornan de color negro. Los insectos saprófitos son atraídos a las áreas de alimentación y los ayudan a dispersarse. Las larvas se mueven considerablemente dentro de las plantas del nopal, usualmente en dirección hacia abajo, terminando en el tallo basal de huertos recién plantados. Los adultos, por otro lado, se alimentan superficialmente masticando los bordes de los cladodios recién formados y ocasionalmente de los frutos (**Figuras 1a y 5a**).

La etapa adulta es el objetivo del control, debido a que las larvas son difíciles de localizar y controlar dentro de las plantas.

Figura 4
Insectos picudos plaga del nopal y su ciclo de vida:
a) adulto de *Metamasius spinolae*, b) huevecillo, c) larva y d) pupa; e) adulto de *Cylindrocopturus biradiatus*, f) huevecillo, g) larva y h) pupa; i) adulto de *Gerstaeckeria* spp. j) larva, k) daños en el interior de un cladodio ocasionados por la larva.



Chinches

Existen unos cuantos fitófagos en la superficie de los nopales con partes bucales picadoras o masticadoras - probablemente por la ausencia de hojas verdaderas en los nopales (Dodd, 1940). Los más comunes son las chinches apestosas, la grana cochinilla, trips y escamas. Las chinches coreidas del género *Chelinidea* y *Narnia*, así como la chinche roja mírida (*Hesperolabops*) son buenos ejemplos de chinches chupadoras. Estos insectos representan menos riesgo de daño a las plantas de nopal comparados con los lepidópteros, picudos y escarabajos de antenas largas o la cochinilla grana anteriormente descritas; es muy raro que su actividad de alimentación ponga en riesgo o destruya una plantación de nopal. El daño más común desde el punto de vista de los productores es la reducción en la calidad de las tunas. *Hesperolabops* tiene el mayor potencial para causar este tipo de daño, por que alcanza poblaciones altas alimentándose de los cladodios y tunas (*Narnia* también se alimenta de tunas) y su control es complicado.

La fase adulta de la chinche gris del nopal *Chelinidea tabulata* (Burmeister), tiene cuerpo verde grisáceo; Las ninfas de primer instar recién eclosionadas son negras, volviéndose de color verde conforme avanzan en edad; los adultos son de 13 - 15 mm (**Figuras 6a y 6c**). La chinche de las tunas, *Narnia femorata* Stal es de color púrpura fuerte a negro como adulto; es más delgada y pequeña que la chinche gris del nopal; las fases inmaduras son de color gris oscuro con áreas

amarillo pálido en las antenas, tórax y patas (**Figuras 6d y 6f**). La etapa adulta de la chinche roja del nopal (*Hesperolabops gelastops* Kirkaldi) tiene cabeza y protórax en color rojo mientras que el resto del cuerpo es oscuro con una banda pálida a los lados del tórax y abdomen (**Figura 6h**); es una chinche pequeña, de longitud entre 6-8 mm. Las chinches recién eclosionadas son completamente rojas (**Figura 6i**) y mantienen su color conforme crecen, así como la banda pálida alrededor del cuerpo; solo los primordios alares son grises (**Figura 6j**). Ambas chinches *Chelinidea* y *Narnia* depositan varios huevecillos a lo largo de la espina del cladodio (**Figura 6**) (Mena Covarrubias, 2013). *Hesperolabops*, por otro lado, inserta sus huevecillos bajo la epidermis del cladodio del nopal, con el opérculo cerca de la epidermis (Palomares Perez, 2011). Los periodos de desarrollo para las etapas de huevecillo y ninfas son de 21 y 56 días respectivamente para *C. tabulata* (Brailovsky *et al.*, 1994); 13 y 67 días para *N. femorata* (Vessels *et al.*, 2013); y 29 y 36 días para *H. nigriceps* Reuter (Palomares Perez, 2011). Tanto los adultos como los inmaduros son gregarios a diferentes grados y se presentan durante todo el año en una plantación de nopal; se mueven al mismo tiempo en la planta del nopal, buscando la parte opuesta, como si estuvieran tratando de esconderse del observador.

Los adultos y las ninfas de las chinches se alimentan haciendo punciones en los cladodios, uniones y frutos; dejan un área de color amarillo pálido alrededor del punto de alimentación, de

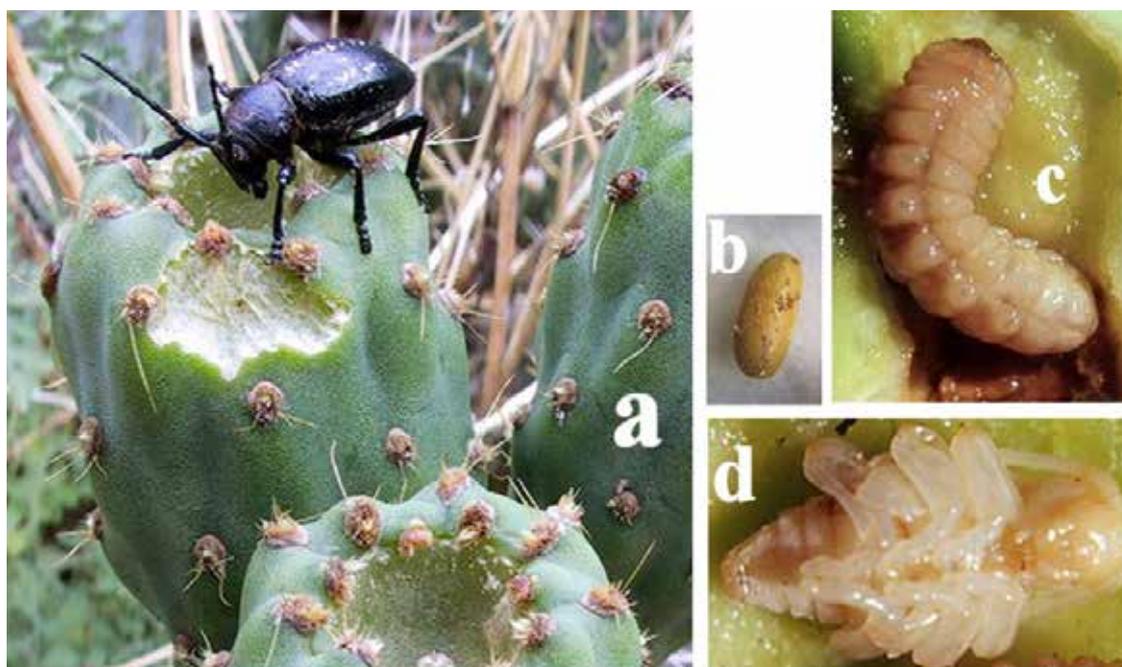


Figura 5
Etapas de *Moneilema*:
a) adulto,
b) huevecillo,
c) larva y adulto

tal manera que las áreas afectadas tiene la apariencia de manchas (**Figura 1e**). Las poblaciones densas pueden causar que el cladodio tenga una apariencia amarilla y pegajosa, especialmente en huertos recién plantados. Los daños de *Narnia* a los frutos producen áreas esponjosas en la pulpa en cada sitio de alimentación (**Figura 6g**); mientras que las manchas son menos jugosas y dulces, éstas son pequeñas y superficiales, el promedio de las personas no las puede detectar. Por otro lado, poblaciones grandes de la chinche roja del nopal evitan que el tejido externo de las tunas alcance su color normal, y reducen el contenido de azúcar, lo cual afecta el precio del producto. En adición, la chinche roja se asocia con una enfermedad denominada "cacarizo" que afecta al cultivar Reyna en el Altiplano Mexicano y cubre la epidermis de los cladodios con ampollas (Palomares Perez, 2011), reduciendo drásticamente la productividad del huerto.

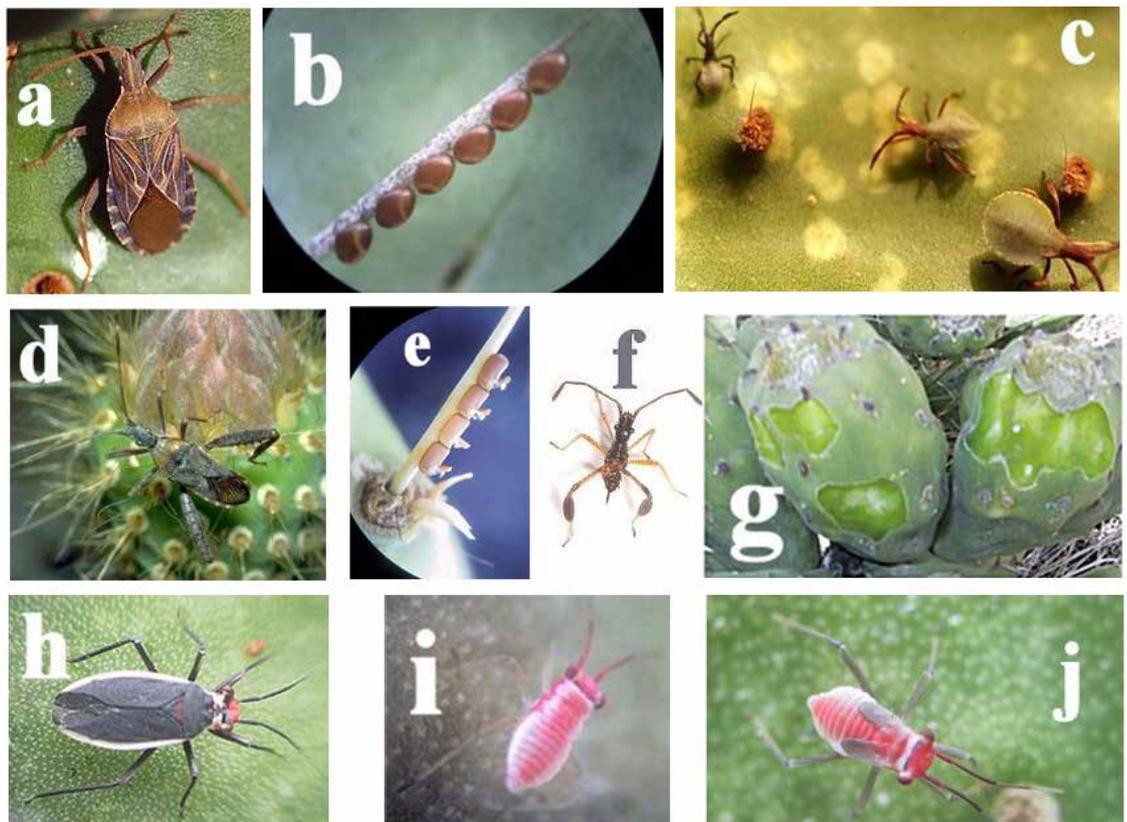
Los objetivos del control de las chinches en los nopales son los individuos adultos y las ninfas, debido a que se alimentan externamente; los insectos recién eclosionados son los más susceptibles a los agentes de control.

Otros insectos plaga del nopal

Hay un número reducido de especies de moscas que se alimentan de plantas de nopal. *Asphondylia* es la más importante ya que se alimenta de las semillas del nopal, mientras que *Mayetiola*, *Lonchaea* y *Dasiops* viven en los cladodios y causan poco daño (Mann, 1969). Las moscas de la fruta son reportadas ocasionalmente como insectos plaga alrededor del mundo, particularmente en el área del Mediterráneo (Zimmermann y Granata, 2002). Los trips son comúnmente encontrados en huertos de nopales, especialmente *Neohydotothrips opuntiae*; dañando la epidermis de los cladodios y frutos tiernos en desarrollo. Finalmente las escamas - la escama del nopal (*Diaspis echinocacti*) y la escama dura (*Lepidosaphes* spp.) - se alimentan externamente de los cladodios; su presencia es limitada a un pequeño número de plantas por huerto y se vuelven importantes si sus enemigos naturales son destruidos con el uso de insecticidas de amplio espectro.

Figura 6

Etapas de desarrollo de las chinches:
 a) adulto de *Chelinidea tabulata*,
 b) huevecillos,
 c) inmaduros;
 d) adulto de *Narnia femorata*,
 e) huevecillos,
 f) ninfas,
 g) daño a las tunas,
 i) primer instar,
 j) último instar.



MANEJO INTEGRADO DE PLAGAS PARA LOS INSECTOS PLAGA

El manejo integrado de plagas (IPM) es una estrategia para controlar insectos plaga usando tácticas de control con rango amplio. Para maximizar la reducción de poblaciones plaga, aun que se requieren conocimientos de ecología y biología de los insectos plaga y sus enemigos naturales. Las prácticas clave del IPM en huertos de nopal se describen a continuación:

Poda

El mantenimiento del huerto incluye una poda anual, la cual puede afectar una población de insectos en tres formas diferentes (Mena Covarrubias, 2011, 2012):

- Una densa copa ofrece abundantes oportunidades para la sobrevivencia de los insectos durante el invierno y también reduce la eficiencia de las aspersiones. Para optimizar los beneficios de la poda, el traslape de los cladodios debe mantenerse al mínimo.
- La poda provee una oportunidad en invierno para eliminar completamente del huerto y destruir al picudo de las areolas, el picudo del tiro de munición y el minador del cladodio (*Marmara opuntii* Busck), así como con los cladodios infestados del primer año. La eficiencia de esta práctica se promueve si varios productores la realizan al mismo tiempo. Los nopaleras aledañas deben ser incluidas en la campaña.
- Para optimizar los efectos positivos de la poda, nunca deje los desechos de la poda en el suelo del huerto. Los residuos son refugio potencial para el desarrollo y reproducción de la grana cochinilla, picudos del nopal, escarabajos de antenas largas y barrenadores de las uniones del cladodio.

Enfocándose en la emergencia

Para controlar las larvas de lepidópteros plaga recientemente eclosionadas, es esencial controlarlas en la emergencia. Una vez que las larvas están dentro del tejido del nopal, el control externo no es adecuado. Es más bien crítico el monitoreo de las fases adultas (palomillas) y puntualizar los picos de población. Se ha desarrollado una feromona para atrapar los machos de la palomilla del nopal (Heath *et. al.*, 2006). Las otras especies de palomillas pueden ser muestreada usando trampas de luz en Septiembre - Octubre (gusano blanco del nopal), Abril - Junio y Septiembre - Noviembre (gusano cebra del nopal) y todo el año (el barrenador de las uniones del nopal) (Mena Covarrubias, 2011, 2012). Las fases adultas de *Cactoblastis*, *Olycella* y *Melitara*, por otro lado no se alimentan (Mann, 1969), y las trampas de alimento no pueden ser adoptadas para trampeo o monitoreo.

Trampeo masivo

Es posible realizar trampeos masivos de picudos del nopal porque los machos liberan feromona de agregación para hembras y machos, especialmente si las trampas son colocadas en cladodios del nopal (Tafoya, 2006). Los picudos del nopal, escarabajos de antenas largas y picudos del tiro de munición son escarabajos que no vuelan y pueden ser controlados quitándolos con las manos, especialmente si el área de infestación es marcada y la actividad se concentra ahí. Para los escarabajos de antenas largas y el picudo del tiro de munición, el control debe realizarse al anochecer y amanecer porque son insectos nocturnos; por otro lado los insectos dejan un rastro de alimentación típico (**Figura 1a, 4m, 5a**), y durante el día es posible señalar cuales plantas de nopal fueron afectadas la noche previa.

Control biológico

El control biológico es un elemento fundamental para el manejo de insectos. En el caso de los insectos plaga, el control biológico implica la conservación de enemigos naturales presentes en los huertos, lo cual requiere:

- Identificación de insectos benéficos;
- Proveer opciones de alimento alternativo para los adultos, especialmente polen y néctar de plantas alrededor del huerto; y
- No usar insecticidas de amplio espectro (Mena Covarrubias, 2014)

El control biológico por aumento puede ser implementado usando hongos entomopatógenos (e.g. *Beauveria bassiana*) para el control de insectos tales como el gusano blanco del nopal (Lozano Gutierrez y Espania Luna, 2008). Los desafíos son como poner en contacto al agente de control con el insecto objetivo, porque la mayoría de las plagas del nopal se alimentan internamente y pasan la mayor parte del ciclo de vida dentro de los tejidos del nopal.

Control químico

Solo un número limitado de insecticidas están permitidos para el control químico en plantas de nopal, sin embargo, insecticidas orgánicos - tal como piretroides, tierra de diatomeas, *Bacillus thuringiensis*, neem y jabones insecticidas - están disponibles y pueden potencialmente incrementar el espectro de las alternativas químicas para el control de insectos. Se requiere investigación en la cobertura de la aspersión y el impacto de velocidad de las gotas para optimizar el control de plagas en las plantas de nopal.





12

Procesamiento y utilización de frutos, cladodios y semillas

Carmen Sáenz

Departamento de Agroindustria y Enología

Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. Santiago, Chile



Procesamiento y utilización de frutos, cladodios y semillas

INTRODUCCIÓN

Un escritor italiano alguna vez llamo al nopal “tesoro bajo las espinas”, debido a sus inmensos beneficios, algunos de los cuales son poco conocidos hasta hoy. En numerosos países -Argentina, Chile, Perú, Bolivia, Sudáfrica, Egipto, Turquía, Etiopía, Eritrea y otros países de Sudamérica y la cuenca del Mediterráneo - es tradicional el consumo de la tuna. Por otro lado, en México además de la fruta, es común el consumo de los cladodios tiernos o *nopalitos*, ambos fruta y nopalitos son perecederos y las tecnologías de procesamiento son necesarias para incrementar su vida de anaquel. Adicionalmente ambos contienen numerosos compuestos bioactivos que deben ser preservados durante el proceso si se desea que los consumidores obtengan todos sus beneficios. La tuna es una fruta multipropósito de la cual se pueden derivar un amplio rango de productos y subproductos. Los mismo aplica para los cladodios. Sáenz *et al.*, (eds., 2006, 2013) presentan numerosas alternativas para el proceso de tunas y nopalitos. Los avances más recientes en este campo son presentados en este capítulo.

COMPOSICION QUIMICA Y COMPUESTOS BIOACTIVOS

Antes de que cualquier materia prima vegetal se procese es esencial entender su composición química y fitoquímica, así como cualquier característica tecnológica relacionada con el proceso industrial. Para el caso del nopal, se requiere información acerca de su composición química de la fruta, semillas y cladodios. Además de una extensa

comprensión de los compuestos bioactivos de estas partes de la planta, sus actividades y los beneficios relativos a la salud.

Existe abundante investigación sobre la composición química de las partes comestibles de las tunas cultivadas en diferentes partes del mundo, incluyendo Egipto, Arabia Saudita, México, Chile y Argentina. Existe información extensa sobre la composición y usos de las semillas como fuente de aceite, fibra y proteína, en particular los análisis detallados de Sáenz *et al.*, eds., (2006).

Dentro del género *Opuntia*, la especie más cultivada es *Opuntia ficus-indica*, caracterizada por su fruta jugosa, de pulpa dulce de diferentes colores; blanco-verdosa, amarilla, anaranjada, roja o morada. La proporción de pulpa en la fruta varía y la cascara es generalmente delgada. Las variedades coloreadas (**Figura 1**) tienen una aplicación doble, producción de colorantes naturales (betalainas) y beneficios a la salud gracias a sus propiedades antioxidantes (Butera *et al.*, 2002; Galati *et al.*, 2003a; Kuti 2004; Tesoriere *et al.*, 2005a; Stinzing *et al.*, 2005; Azeredo, 2009; Fernández López *et al.*, 2010).

Otros compuestos bioactivos presentes en las tunas son la vitamina C, carotenoides y fibra dietaria (Morales *et al.*, 2009; Sáenz *et al.*, 2009, 2012a). los cladodios del nopal poseen un alto contenido de agua, fibra dietaria y minerales (Pimienta Barrios, 1990; Sáenz *et al.*, eds. 2006). Las semillas son ricas en ácidos grasos esenciales tales como el ácido linoleico (Ennouri *et al.*, 2005; Özcan y Al Juhaimi, 2011).

Existen variaciones menores entre la composición química de las tunas de diferentes colores; las mayores diferencias están relacionadas con el contenido de pigmentos. La **Tabla 1** resume los

Figura 1
Variedades de tunas de diferentes colores (*Opuntia ficus-indica*) (Estación Experimental de Antumapu, Universidad de Chile, Santiago. (Fotos C. Sáenz y A.M. Fabry).



TABLA 1 Características químicas y tecnológicas de la pulpa de la tuna de varios colores

Parámetros	Tuna verde	Tuna morada	Tuna amarilla-anaranjada
pH	5.3-7.1	5.9-6.2	6.2-6.3
Acidez (% de ácido cítrico)	0.01-0.18	0.03-0.04	0.55-0.57
Sólidos solubles (oBrix)	12-17	12.8-13.2	13.5-14.5
Vitamina C (mg 100 g ⁻¹)	4.6-41.0	20.0-31.5	24.1-28.0
β-caroteno (mg 100 g ⁻¹)	0.53	–	0.85-2.28
Luteína (μg g ⁻¹)	26.0	0.15	0.04
Betacianinas (mg 100 kg ⁻¹)	0.1-0.8	111.0-431.0	2.4-11.0
Betaxantinas (mg 100 kg ⁻¹)	0.4-3.1	89.4-195.8	16.0-76.3

Fuentes: Askar y El Samahy, 1981; Pimienta barrios, 1990; Sawaya *et al.*, 1983; Sepúlveda y Sáenz, 1990; Sáenz y Sepúlveda, 2001 a; Sáenz *et al.*, 2006; Stintzing *et al.*, 2005; Hernández Pérez *et al.*, 2009b; Morales *et al.*, 2009; El Gharras *et al.*, 2006; Coria Cayupan *et al.*, 2011; Sáenz y Fabry (datos no publicados)..

rangos de ciertos compuestos químicos y sus características tecnológicas, basadas en valores reportados por diferentes autores. Las tunas rojas, moradas y amarillo-anaranjadas contienen betalainas, mientras que las rojas y moradas contienen betacianinas y las amarillo-anaranjadas contienen betaxantinas (Stintzing *et al.*, 2005; Saenz *et al.*, 2012b).

La composición química puede variar de acuerdo a diversos factores:

- origen de las plantas (e. el clima donde es cultivada);
- factores agronómicos; tales como cultivo, fertilización y riego; o
- diferencias genéticas (Muñoz de Chavez *et al.*, 1995; Ochoa, 2008).

La tuna es rica en calcio, aunque según McConn y Nakata (2004) la biodisponibilidad del calcio puede ser baja, debido a que está presente como oxalato de calcio, el cual no es absorbido. Su alto contenido de potasio y bajo contenido de sodio ofrece claros beneficios nutricionales para personas con problemas de riñones e hipertensión.

CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS

Fruta

Además de la composición química y los compuestos bioactivos, existen otras características a considerar durante el proceso. En general, la tuna tiene un pH alto (5.3-7.1) y por lo tanto es clasificada como alimento de baja acidez (pH ≥ 4.5); con la excepción del xoconostle el cual presenta una acidez más alta (pH > 3.5) (Mayorga *et al.*, 1990). Es bien conocido que el tratamiento con calor dependen de el pH (Casp y Abril, 1999). Por esta razón, cuando los alimentos no-acidicos son pasteurizados o enlatados, a menos que se reduzca el pH

(agregando ácido cítrico) es necesaria una temperatura más alta para reducir los conteos microbianos a un nivel seguro comparados con el tratamiento de alimentos acidicos (pH ≥ 4.5). Las temperaturas altas, generalmente mayores a $> 121^{\circ}\text{C}$ pueden afectar negativamente el sabor, color y aroma. El pH y el alto contenido de sólidos solubles de la pulpa favorecen el crecimiento de microorganismos (Sáenz y Sepúlveda, 1999; Sáenz, 2000). Por lo tanto es importante el control de los tratamientos de calor en los procesos de preservación.

Desde el punto de vista sensorial, la fruta verde de algunos países (i.e. Chile), tienen mejor textura, sabor (dulce) que las tunas moradas y anaranjadas, las cuales tienden a ser harinosas. Por otro lado, estas variedades tienen gran potencial en el procesamiento, debido a que su contenido de betalainas es más estable que las clorofilas, en relación al pH y el calor (Merin *et al.*, 1987; Montefiori, 1990; Castellar *et al.*, 2003; Sáenz y Sepúlveda, 2001a; Saenz *et al.*, 2012b).

Cladodios

La presencia de mucilago y pectina en los cladodios influencia la viscosidad de algunos productos, tales como las preparaciones en polvo para mezclarse con agua o jugos antes del consumo. Ambos compuestos son hidrocoloides, forman parte de la fibra dietaria, conocidos por su habilidad para absorber y retener agua. Esto pueden ser extraídos y usados como espesantes en alimentos (Sáenz *et al.*, 2003; 2004; Sepúlveda *et al.*, 2003a; 2007).

La composición química de los nopalitos ha sido reportada por Pimienta Barrios (1990) y Maki Díaz *et al.*, (2015). Similar a otros vegetales, presentan alto contenido de agua y fibra. Los polifenoles están presentes y tienen una actividad antioxidante importante en la dieta; sin embargo, durante la preservación, estos causan oscurecimientos debidos a la oxidación (Rodríguez

Félix, 2002). Adicionalmente, la acidez de los nopalitos varia durante el día - como resultado del metabolismo del ácido crasuláceo (CAM) - (Cantwell *et al.*, 1992)- por lo que el tiempo óptimo de cosecha debe ser seleccionado dependiendo del proceso que se aplicara.

Semillas

Las semillas representan alrededor del 15% de la porción comestible de la fruta y presentan contenido variable de aceite (en promedio 9.8% g 100 g⁻¹ de semillas) (Ramadan y Morsel, 2003 a).

El aceite de semillas de tuna es rico en ácidos grasos no saturados (Sepúlveda y Sáenz, 1988; Ennouri *et al.*, 2005; Ghazi *et al.*, 2013); es por lo tanto de interés en las industrias farmacéutica y de cosméticos, por ejemplo, en Marruecos y Túnez. Dado el bajo rendimiento de aceite de la semilla, no es económico ni atractivo usarlo como aceite comestible. La presencia de tocoferoles, reconocidos como antioxidantes varia de 3.9 a 50%. Matthaus y Ozcan (2011) y Ozcan y Juhaimi (2011) reportan que la fibra y minerales son componentes importantes de la semillas, con 12.5% de fibra cruda y altas cantidades de calcio, potasio y fósforo, así como otros minerales. El contenido relativamente alto de proteína (aproximadamente 6%) significa que la semilla de la tuna es una fuente de proteína para consumo humano (Tlili *et al.*, 2011).



TECNOLOGIAS DE PROCESO

Existe un amplio rango de tecnologías que pueden ser aplicadas a la tuna, los cladodios y las semillas. algunas fueron descritas por Sáenz *et al.*, eds. (2006) y otras más novedosas son descritas en este capítulo.

Productos deshidratados

La actividad de la agua (a_w) es la medida del "agua disponible" en un alimento. La disponibilidad de agua en los tejidos de la planta es variable, y existe una diferencia entre "agua libre" y "agua ligada". La proporción de agua libre y ligada depende principalmente de la composición del alimento, compuestos tales como los hidrocoloides pueden tener una mayor capacidad de retención de agua. El mucilago presente en las pencas y frutas del nopal es un ejemplo de un hidrocoloide.

El crecimiento microbiano puede ser controlado bajando el a_w , entre valor mínimo de a_w para el crecimiento microbiano es variable. De acuerdo con Roos (2007), su valor es >0.90 para bacterias, 0.87-90 para levaduras, 0.80-0.87 para mohos y 0.60-0.65 para levaduras osmofílicas.

Las tecnologías usadas para reducir la a_w en la conservación de alimentos incluyen la deshidratación bajo congelación, que combina frío con la reducción de a_w para controlar el crecimiento de microorganismos

Productos deshidratados de la tuna

La deshidratación es uno de los métodos más antiguos de los procesos de preservación de alimentos. Esta puede realizarse por medios naturales - secado solar - o con equipos tales como los túneles de deshidratación, rodillos, secadores y secadores por aspersión. Recientemente se han desarrollado procesos altamente controlados que ofrecen productos secos más homogéneos y de mayor calidad.

En relación a la tuna, existen varios estudios de deshidratación en láminas finas de pulpa para preparar productos naturales masticables. Estos son conocidos como "laminillas", "pieles" "barras de fruta" o "rollos de fruta", que difieren en grosor y contenido de humedad: las laminillas son más delgadas y bajas en humedad, mientras que las barras presentan mayor contenido de humedad ($\leq 20\%$). La Universidad de Chile desarrollo un proceso para preparar un rollo de fruta a base de una mezcla de pulpa de tuna y pulpa de membrillo o de manzana. Las tunas de color son usadas para hacer productos con buen sabor y textura y apariencia atractiva (Sepúlveda *et al.*, 2000, 2003b) (**Figura 3**). La **Tabla 2** muestra las características de algunos de estos productos.

Todos los tratamientos contienen:

- 75% de pulpa de tuna;
- 25% de pulpa de manzana;
- Cantidades variables de sucrosa (T1 y T2 = 6% y T3 = 0% de sucrosa y 0.01% de sucralosa); y
- Cantidades variables de semilla de linaza (T1=0%; T2 y T3 1.

La fibra dietaria total de los tratamientos es de 14.1-43.9%, la variedad morada presenta un alto contenido de fibra debido a su alto contenido de pulpa, se agregó sucralosa en vez de azúcar.

El diagrama de flujo de la **Figura 2** muestra los pasos necesarios para la producción de laminillas de tuna y la **Figura 3** muestra el de las pulpas de tuna y manzana, así como el horno usado para secar las laminillas.

EEl Sahamy *et al.*, (2007 a) prepararon laminillas de tuna, probando diferentes temperaturas de secado (60 y 70 °C) y varias proporciones de sucrosa (0, 1, 2, 3, 4, 5 y 10%). Las pulpas fueron preparadas en una capa de 10 mm de grosor y deshidratadas en un horno de convección por 44 horas. Las laminillas preferidas fueron aquellas preparadas con 2 y 3% de sucrosa.

TABLA 2 Fibra dietaria y componentes fenólicos totales de rollos de tunas de colores mezclados con pulpa de manzana y semilla de linaza

Parámetro/tratamiento	Rollos de pulpa de tuna amarilla-anaranjada		
	T1	T2	T3
Fibra dietaria total (g 100 g ⁻¹)	14.1 a	24.3 b	38.8 c
Fenoles totales (mg GAE* kg ⁻¹)	1 445.3 a	1 365.0 a	1 640.1 b
	Rollos de pulpa de tuna morada		
	T1	T2	T3
Fibra dietaria total (g 100 g ⁻¹)	20.2 a	28.9 b	43.9 c
Fenoles totales (mg GAE kg ⁻¹)	1 404.7 a	1 438.0 b	1 846.0 b

* GAE = Equivalente de ácido galico. Medias seguidas de literales diferentes difieren a P<0.05
Fuente: Sáenz *et al.*, datos no publicados.



Figura 2
Preparación de rollos de tuna (adaptado de Sáenz *et al.*, eds. 2006).



Figura 3
Pulpa de nopal y manzana; secadora de charola eléctrica; rollos de tuna de colores (Fotos: C. Saenz y A.M. Fabri)

Los productos deshidratados usualmente no contienen aditivos; por lo tanto pueden ser reconocidos como "productos naturales", y son aceptados por los consumidores por considerarlos seguros.

Esta simple tecnología, hasta donde el autor sabe, no ha sido usada a nivel comercial. Mientras hay compañías ofreciendo rollos de manzana, fresa, cereza, y albaricoque, estos productos usualmente no son 100% naturales y son típicamente fabricados con puré concentrado de pera además de colorantes y saborizantes artificiales.

La calidad de tales productos puede ser mejorada fácilmente usando pulpa de tuna de colores para preparar un producto natural y más saludable.

Productos de cladodios deshidratados

Las opciones de deshidratación para cladodios difieren de las de las frutas. Los cladodios no son deshidratados para consumo directo sino transformados en polvos (Sáenz *et al.*, 2010) con un alto contenido de fibra dietaria. Este polvo puede usarse en la preparación de galletas (mezclado con harina de trigo), pudding y en algunos países - especialmente México - cereales para el desayuno o tortillas. También puede ser usado en la producción de suplementos alimenticios (capsulas, tabletas, etc.).

Rodríguez García *et al.* (2007) observaron que durante el desarrollo de los cladodios jóvenes la fibra insoluble incrementa (de 29.87% en cladodios de 60 g a 41.65% en cladodios de 200 g); mientras que la fibra soluble decreció (de 25.22 a 14.91%,

respectivamente). Ayadi *et al.*, (2009) prepararon polvo usando pencas de 2-3 años; la fibra dietaria total fue de 51.24 %, de la cual 34.58 % fue fibra insoluble y 12.98 % fibra soluble.

Este polvo puede tener una contribución nutricional para varios productos alimenticios incrementando el consumo diario de fibra dietaria. Sin embargo, esto implica algunos retos tecnológicos, debido a que se requeriría mejorar el sabor y la textura (Sáenz, *et al.*, 2002b, c, Ayadi *et al.*, 2009). Por ejemplo los tratamientos de calor resultaron en aromas y sabores herbáceos, y el mucilago presente en los cladodios afecta la textura (Sáenz, *et al.*, 2002 a). Esta investigación resulto en una fibra dietaria natural purificada con 80 g 100 g⁻¹ de fibra dietaria total y 20-22 g 100 g⁻¹ de fibra dietaria soluble, una de los tipos de fibra más escasos en los vegetales. La purificación resulta en un incremento de la fibra dietaria total, una reducción del color verde del polvo y en decremento de los compuestos fenólicos totales, en particular cuando los cladodios son lavados a altas temperaturas. Este proceso de purificación es prometedor y podría resultar en un uso más amplio del polvo de cladodios de nopal como aditivo de alimentos, especialmente en mercados donde los consumidores no están familiarizados con el sabor herbáceo de los cladodios de nopal, afectando su aceptación. Se requiere investigación adicional para obtener un polvo rico en fibra dietaria, con menos sabor y color y con alta capacidad antioxidantes para usarse como ingrediente en nuevas formulaciones de alimentos.

Figura 4
Coberturas de tunas de colores sobre postres lácteos



Concentrados de tuna

El rango de productos concentrados derivados de la tuna incluye jarabes, mermeladas y jugos concentrados (Sáenz, 2000). Morales *et al.*, (2009) desarrollaron coberturas de postres (toppings) de tunas de colores con excelentes resultados, preservando el color atractivo y sus compuestos funcionales. La concentración al vacío fue usada en mezclas de pulpa de tunas con azúcar (22.0-

TABLA 3 Compuestos bioactivos de tunas de colores usadas en la preparación de coberturas de postres

Compuesto bioactivo	Cubierta de tuna morada	Cubierta de tuna anaranjada
Carotenoides	0.186 ± 0.001	0.021 ± 0.001
Fenoles totales (mg GAE litre ⁻¹)*	350.50 ± 15.25	131.48 ± 5.72
Betalainas	81.06 ± 1.83	63.80 ± 1.86
Betacianinas (BE mg kg ⁻¹)	66.09 ± 1.03	0.92 ± 0.00
Betaxantinas (IE mg kg ⁻¹)	14.97 ± 1.53	62.88 ± 1.86

* GAE: Equivalente de ácido galico, BE contenido de betacianina; IE: equivalente de indicaxantina (Morales *et al.*, 2009).

30.25%), ácido cítrico (0.14%) y almidón modificado (1.5%). estos atractivos productos pueden ser usados en amplio rango de platillos (**Figura 4**). La **Tabla 3** enlista los compuestos bioactivos presentes en las coberturas ambos colores.

Se han manufacturado una amplia variedad de alimentos basados en tunas (Sáenz *et al.*, eds., 2006). Las compañías usan el internet para anunciar las diferentes formas de consumo y disfrute de los productos de tuna, ofreciendo productos concentrados, tales como las mermeladas, jarabes y dulces. La información disponible en línea sugiere que estos productos son principalmente artesanales obtenidos por empresas pequeñas.

Dulces de gel de tuna

La investigación del grupo de la autora en la Universidad de Chile condujo recientemente al desarrollo de los dulces de geles de tuna usando la pulpa de diferentes variedades de tuna de color, para aprovechar el atractivo de los pigmentos (Sáenz y Fabry, datos no publicados). Estos productos - obtenidos de la evaporación de la pulpa y agregando agentes gelificantes como la pectina - han probado ser muy populares entre los pequeños productores de las zonas áridas de Chile, donde existe escasez no solamente de agua sino también de electricidad. Los geles dulces se hacen con las tecnologías disponibles, permitiendo a los productores proveer valor agregado a su producción de tunas. El diagrama de flujo de la **Figura 5**

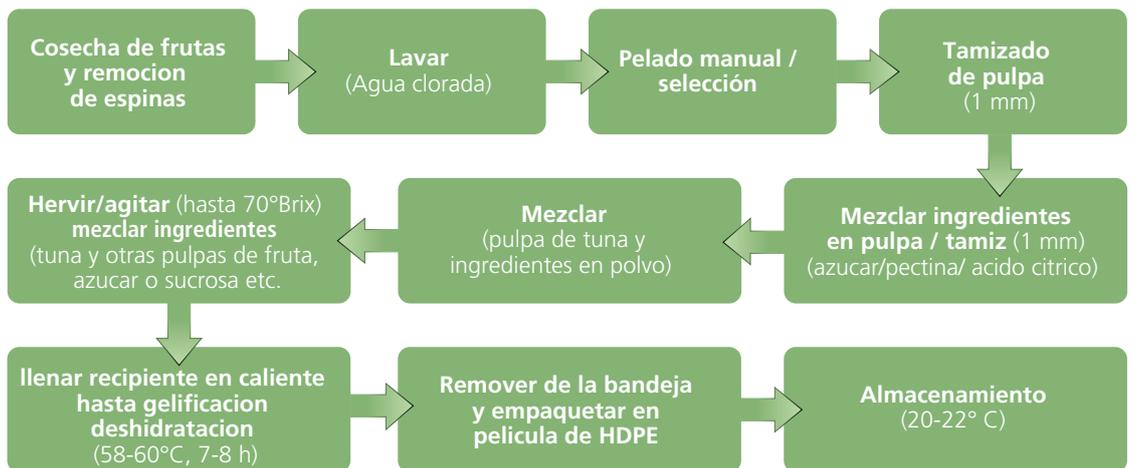


Figura 5
Preparación de geles dulces de tuna



Figura 6
Dulces de colores preparados en un taller de capacitación en el Norte de Chile (Fotos: C. Saenz y A.M.Fabry).



presenta las diferentes etapas en la producción de Los geles dulces de tuna son elaborados a partir de:

- Pulpa sin semilla de tuna (1 000 g);
- Azúcar (760g)
- Pectina (52 g) u otro agente gelificante - e.g carboximetilcelulosa - CMC) podría ser probada o una mezcla de pulpa de frutas ricas en pectina como el membrillo;
- Ácido cítrico (16g), que puede ser substituido por jugo de limón.

La **Figura 6** muestra la manufactura de geles dulces preparados por pequeños agricultores del poblado de Codpa (Arica y Parinacota, Chile) en un taller conducido por nuestro grupo, esta comunidad está ubicada en Camarones, en medio del Desierto de Tarapaca al Norte de Chile, un área con restricciones de agua y energía eléctrica donde el nopal crece como cultivo alternativo.

Recientemente, Sáenz y Fabry (datos no publicados) desarrollaron confecciones gomosas de pulpa de nopal, mezclando pulpa pasada por un

tamiz fino (2.5 litros) con gelatina sin sabor (0.45 kg), agua (2 litros) y azúcar (1.5 kg) (**Figura 7**).

El producto final posee una apariencia brillante muy atractiva (**Figura 8**) y alta aceptación sensorial. Los parámetros de color de estas confecciones son $L=5.6$, $a^*=30.0$, $b^*=0$, $C=31.3$ y $hab=16.6$, correspondiente a un color morado oscuro. A pesar del contenido de sólidos solubles de 56.5° Brix, el producto muestra alta a_w (0.92). por esta razón y para asegurar una buena vida de anaquel, se recomienda usar preservativos (e.g. benzoato de sodio y sorbato de potasio).

Mermeladas de nopal

La preparación de mermeladas combina tratamientos de calor con una reducción de a_w (en ocasiones también del pH para permitir tratamientos térmicos menos severos) Existen diferentes mermeladas y jarabes en los mercados de diferentes países (Sáenz *et al.*, eds. 2006). Un producto innovador y del cual recientemente se transfirió la tecnología a productores del Norte de Chile, es

Figura 7
Preparación de gomitas de tuna.

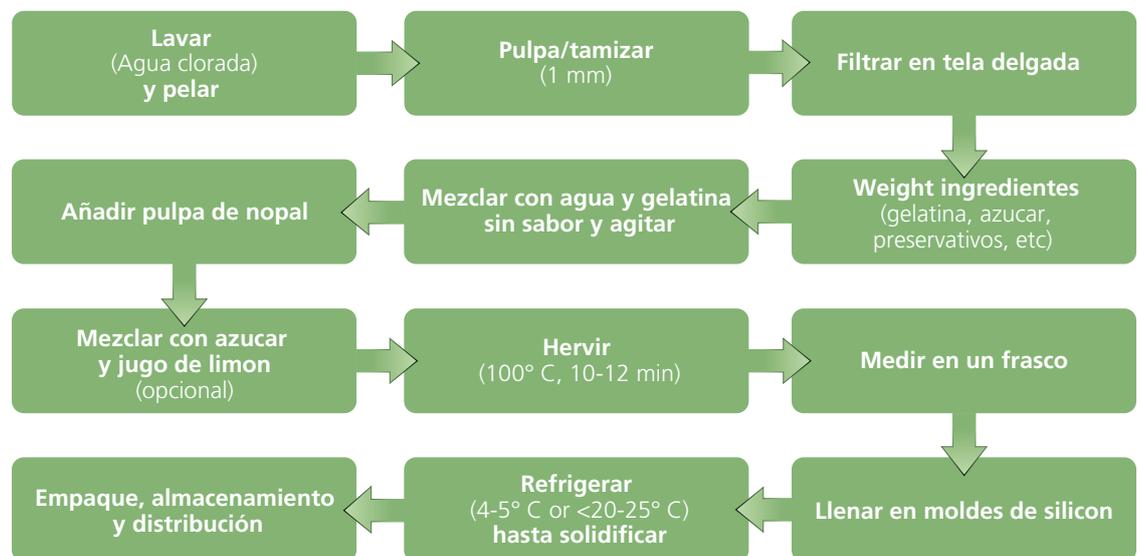


Figura 8
Gomitas de tuna preparadas con tunas moradas y anaranjadas y una mezcla de ambas. (Foto: C. Saenz y A.M. Fabry)



la mermelada de cladodios de nopal y limón y mermelada de nopal. Para remover el exceso de mucilago que afecta la textura, los cladodios fueron pretratados con $\text{Ca}(\text{OH})$. Este pretratamiento puede ser evitado si los cladodios presentan bajo contenido de mucilago. El diagrama de flujo presentado en la **Figura 9** describe los pasos necesarios para la preparación de mermelada de nopal.

La mermelada de nopal presenta nuevas alternativas para procesar cladodios. Esta puede ser consumida sobre galletas y productos de panadería, o servida con carne y otros platillos (**Figura 10**).

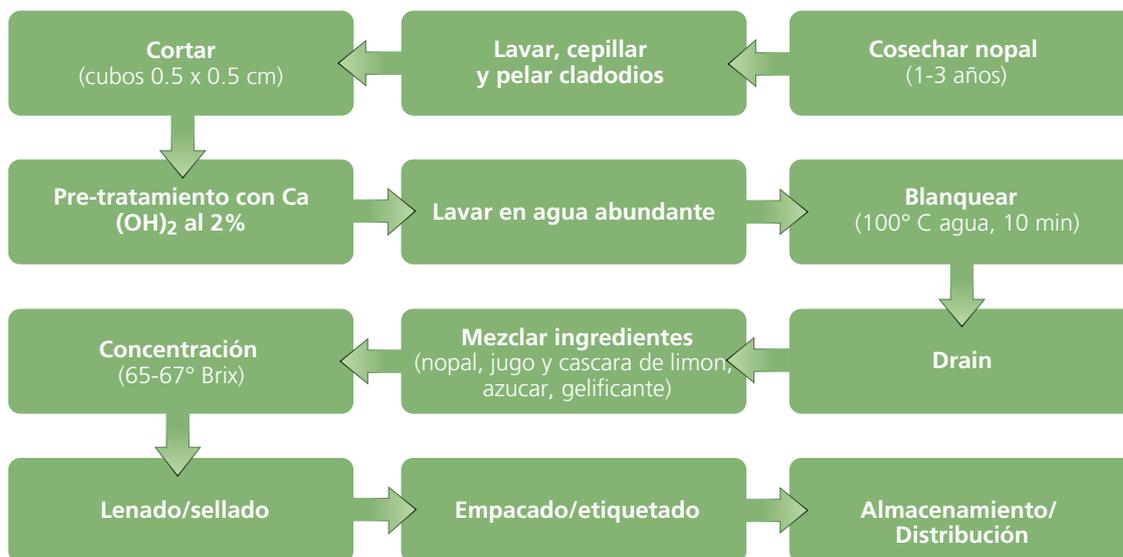


Figura 9
Preparación de mermelada de nopal (cladodios y limón) modificado de Sáenz et al., eds. 2006)



Figura 10
Mermelada de cladodios de nopal y limón (Fotos: C. Saenz y A.M. Fabry)

Jugos de tuna

La pasteurización de jugo de tuna obtenidos de tunas verdes ha producido resultados insatisfactorios, debido a cambios inconvenientes en color y aroma que ocurren durante el proceso. Por otro lado, los jugos de tunas moradas mezclados con otros jugos (e.g. piña) pueden ser una alternativa interesante (Sáenz y Sepúlveda, 2001 a). Sin embargo, la acidez es un problema potencial: la adición de ácidos orgánicos para incrementar la acidez facilita el proceso de calentamiento pero puede modificar el sabor, mientras que los consumidores prefieren generalmente jugos de tuna con la acidez original del fruto, similar al del fruto fresco. (Sáenz y Sepúlveda, 1999). El Samahy et al., (2007a) estudiaron la producción de jugos pasteurizados y esterilizados de tuna, ajustando el pH y agregando preservativos en algunos tratamientos (benzoato de sodio). Se observaron cambios de color a altas temperaturas, pero la estabilidad microbiológica fue conseguida en todos los tratamientos. Bacouche et al., (2013) produjeron diferentes formulaciones de una bebida de tuna

elaborada con suero, la cual fue pasteurizada a 80oC por 20 minutos, y la estabilidad física fue evaluada después de 40 días a 5oC. Los autores observaron que la sedimentación y la turbidez aumentaron (Nephelometric Turbidity Unit-NTU) durante el almacenamiento, también se redujo el color, probablemente debido a la reacción de Maillard.

De Wit et al., (2014) prepararon jugos de ocho variedades de nopal: una variedad de *O. robusta* ("Robusta", morada) y siete variedades de *O. ficus-indica* ("Berg x Mexican", rosa: "Fusicaulis", blanco-verdosa: "Meyers" y "Algerian" rojas y "Santa Rosa": anaranjada, "Skinners Court": Verde-blanca: y "Morado" blanca. Los jugos fueron pasteurizados (60°C por 10 minutos). Los autores reportaron que el tratamiento de calor tuvo un efecto desfavorable en el sabor del jugo y para algunos de los cultivares (i.e. "Santa Rosa") la pasteurización causó que el sabor de tuna y melón del jugo fresco se tornara a amargo y astringente.

Un ejemplo de un producto comercial es una bebida preparada de concentrado de tunas de color,

agua y saborizantes naturales. Este producto está disponible en los mercados de USA, empaçado en presentación Tetra Pak de 1 litro y se vende aproximadamente en US\$ 6 por litro.

Jugo de cladodios y néctares

Rodríguez (1999) reportó varias formulaciones de una bebida hecha de nopalitos, los cuales fueron escaldados a 95°C, licuados y filtrados. Para mejorar el resultado, el líquido fue diluido al 30% con agua, el pH ajustado con ácido cítrico (hasta alcanzar 3.5) y se usó aspartame como endulzante (1 g 335 ml⁻¹). El producto fue pasteurizado a 76°C por 15.2 minutos, con una pérdida ligera de los nutrientes sensibles al calor y otros compuestos.

En años recientes se ha visto un incremento de la oferta de jugos y néctares, principalmente en México. El proceso para obtener jugo de los cladodios de nopal es como sigue:

- Remueva las espinas de los nopales
- Secciónelos en piezas pequeñas:
- Muela usando equipo doméstico o industrial (licuadora);
- Agregue agua para facilitar el proceso;
- Filtre el líquido para separar los sólidos.

El jugo de nopal es producido por varias compañías en México, que también fabrican mezclas de jugos, combinando nopal con naranja, piña, guayaba o apio; los jugos están disponibles para el mercado doméstico y de exportación. Otro producto encontrado en el mercado mexicano es el "agua de nopal", una bebida hecha con jugo de cladodios de nopal y azúcar, usualmente producido en pequeña escala. Otros productos incluyen; el jarabe de nopal, hecho con una base de jarabe de sucrosa (55-75°Brix) y agregando el jugo del cladodio. En Texas (EUA) una compañía produce jarabes de zarzamora y arándano y mucilago de nopal agregado.

Nopalitos enlatados

Las tecnologías de enlatado y pasteurización han sido ampliamente adoptadas para la manufactura de varios productos hechos con nopalitos. En México por ejemplo, se encuentran disponibles los nopalitos en salmuera o escabeche desde hace mucho tiempo (Corrales García y Flores Valdés, 2003). La descripción detallada de la preparación de estos productos fue reportada por Sáenz *et al.*, eds (2006).

Productos congelados

La congelación ha sido ampliamente adoptada para la preservación de alimentos, más que ningún otro método, la congelación permite preservar el sabor, la textura, y las propiedades nutricionales y funcionales. Técnicas tales como los túneles de aire frío (-40°C) o la aspersión de nitrógeno líquido (-196°C), son ampliamente utilizadas por la industria alimentaria para mejorar la calidad del producto final. Entre más rápida sea la congelación, los cristales de hielo que se forman serán más pequeños y mejor la calidad del producto obtenido. La congelación combina los efectos de la baja temperatura; los microorganismos no pueden crecer, las reacciones químicas se reducen y las reacciones metabólicas celulares se retrasan, como efecto de la reducción de la actividad del agua (a_w). (Casp y Abril, 1999; Vieira, 1996; Delgado y Sun, 2000). Sin embargo los experimentos con tunas no han rendido buenos resultados (Saenz *et al.*, eds. 2006). Varios estudios indican que las tecnologías de congelación podrían obtener mejores resultados con pulpa de tuna, más que con el fruto completo, mitades o rebanadas. La descongelación - sin importar el tipo de corte (entero, mitades o rebanadas) - presenta algunos problemas, entre ellos la liberación excesiva de mucilago después de la descongelación, lo que resulta en una apariencia desagradable. Esto sucede aun cuando las frutas se adopte la tecnología descongelación rápida individual, que usa temperaturas cercanas a -40°C.

Los helados preparados con tunas de colores se encuentran en muy pocos países y podrían ser una alternativa interesante para usar la pulpa o concentrados. El Samahy *et al.*, (2009) estudiaron helados preparados con la adición de pulpa de tuna roja (30°B): más 5% de pulpa, proporción que fue la más aceptable. El grupo de investigación del autor está conduciendo actualmente experimentos con este atractivo producto.

OTRAS TECNOLOGIAS

Fermentación

La fermentación es uno de las técnicas más antiguas de conservación, esta ha sido usada en tuna para obtener varios productos. En México se ha usado *O. streptacantha* (var. "Cardona") para producir bebidas alcohólicas desde la época prehispánica, la bebida más tradicional hecha con jugo de esta especie se le conoce como *colonche*

(Corrales García y Flores Valdés, 2003; Díaz, 2003).

Flores (1992) experimento con frutas de *O. streptacantha* y *O. robusta* para elaborar vino y un alcohol destilado. Se obtuvo un vino de 11.6° G.L. de jugo concentrado (20°Brix) usando *O. streptacantha*; el alcohol destilado alcanza 56.2°GL. Ambas especies de nopal produjeron un alcohol con características similares y aroma frutal agradable.

Otro producto con potencial interesante es el vinagre, sobre el cual existen experiencias notables. Pérez (1999) preparo vinagre de tuna anaranjada usando dos tipos de substratos para la fermentación acética: desechos de fermentación alcohólica previa (13.5°GL) y jugo de tuna adicionado con azúcar (22°Brix). en el primer caso se usó *Acetobacter pasterianus* y en el segundo *Acetobacter xylinum*. Ambos vinagres obtenidos presentaron un intenso color amarillo ámbar, limpio y brillante, con aroma agradable y buena aceptación sensorial (**Figura 11**).

Tecnologías de membrana

Las técnicas de separación por membrana han visto incrementado su uso en la industria de alimentos en los últimos 25 años. Actualmente su uso es amplio y adoptado para numerosos propósitos, incluyendo la pasteurización en frío, la clarificación de jugos y la concentración de compuestos bioactivos (Cisse *et al.*, 2011; Rai *et al.*, 2006; Todisco *et al.*, 2002). Las tecnologías de membrana tienen las siguientes ventajas sobre otras tecnologías de separación, filtración tradicional y concentración:

- La operación a bajas temperaturas, 15-15°C, consecuentemente más accesibles por su bajo consumo de energía y se evita la degradación de compuestos sensibles al calor.
- No se usan químicos (apoyos del filtrado o enzimas), a diferencia de la filtración o separación tradicional. Cassano *et al.*, 2010).

En las tecnologías de separación por membranas, la membrana (cerámica o polímeros) actúa como barrera, permitiendo únicamente el paso de ciertos componentes de una mezcla y reteniendo otros. El flujo de estas sustancias es determinado por varias fuerzas activas, incluyendo la presión, la concentración y el potencial eléctrico. Esta selectividad significa, por ejemplo que es posible enriquecer el flujo con una o más sustancias en el flujo de entrada. Dos flujos emergen de la entrada, el permeado (o filtrado) y el retenido (o concentrado). El retenido contiene sustancias que no cruzan la membrana, mientras que el permeado es rico en sustancias que la pasaron (Raventós,

2005). La selectividad depende del tamaño de los poros de la membrana y la afinidad química entre la membrana y las sustancias (Cheryan, 1988; Raventós, 2005).

Los procesos tecnológicos de membrana usados en la industria alimentaria incluyen; microfiltración (MF); ultrafiltración (UF) nanofiltración (NF) y osmosis reversa (OR). La OR es conocida por su efectividad en la desalinización de agua de mar, la investigación inicial con jugo de tuna se enfocó en la MF y UF, usando los métodos normales de clarificación de jugo. (Casano *et al.*, 2007) experimentaron con jugo de la tuna amarillo-anaranjada "Gialla", combinando las tecnologías de membrana con la concentración por destilación osmótica (OD), y usando bajas temperaturas, preservaron las características organolépticas, nutricionales y sensoriales del jugo de la tuna. El proceso de concentración (DO) resultó en una concentración de 61 oBrix, con buen balance de betalainas.

Cassano *et al.* (2010) comparo el comportamiento de MF y UF y la composición fisicoquímica del jugo de tunas amarillas. En ambos procesos los sólidos suspendidos en el jugo fresco fueron completamente removidos y se obtuvo un jugo clarificado, que retuvo las betalainas retenidas. El retenido rico en betalainas, podría ser pasteurizado y agregado a jugo concentrado para preparar, por ejemplo, jugos con pulpa, helados, gelatinas, o formulas infantiles.

Nuestro grupo de investigación uso recientemente esta tecnología para separar o concentrar betalainas de tunas moradas con MF, UF y NF (Cancino, Robert y Sáenz, datos no publicados). Gracias a que se evitaron las altas temperaturas, no hubo degradación de pigmentos, y los extractos de betalainas obtenidos estuvieron libres de mucilago y presentaron un bajo contenido de azúcar de bajo peso molecular. La **Tabla 4** presenta las características de la pulpa de tunas moradas prediluida (P), ultrafiltrada (UF) y nanofiltrada (NF). Los extractos ultrafiltrados y nanofiltrados como se esperaba produjeron soluciones completamente clarificadas (0 NTU), en comparación con la pulpa prediluida (2.453 NTU), la cual contenía mucilago. En la UF, el



Figura 11
Vinagres tipo balsámico de tunas de colores
(Foto: C. Sáenz)

TABLA 4 Características físicas y químicas de la pulpa pre-diluida, ultrafiltrada y nanofiltrada de extracto de tunas moradas

Parámetro	P	UF	NF
Azúcares totales (%)	13.2 ± 0.0 b	9.2 ± 0.3 c	17.5 ± 0.1 a
Turbidez (NTU)	2453 ± 64 a	0.00 ± 0.00 b	0.00 ± 0.00 b
Betacianinas (mg BE litro ⁻¹)	254.0 ± 0.2 a	247.9 ± 4.3 a	216.3 ± 7.0 b
Betaxantinas (mg IB litro ⁻¹)	85.4 ± 0.1 b	88.6 ± 1.2 a	79.1 ± 2.6 c
Fenoles totales (mg GAE litro ⁻¹)	534.8 ± 4.4 b	659.7 ± 5.0 a	673.5 ± 13.5 a
Color			
L	12.5 ± 0.9 c	17.8 ± 0.1 b	19.3 ± 0.03 a
C*	48.0 ± 1.7 c	59.3 ± 0.1 b	62.4 ± 0.1 a
H _{ab}	25.9 ± 1.0 c	30.3 ± 0.1 b	31.4 ± 0.1 a

P = pulpa; UF = pulpa ultrafiltrada ; NF = pulpa nanofiltrada; BE = equivalente de betanina; IE = equivalente de indicaxantina; GAE = equivalente de ácido galico. Literales diferentes en las líneas, significan diferencias estadísticas (Tukey p < 0.05).

Fuente: Cancino, Robert y Sáenz (datos no publicados).

contenido de betacianinas (247.9 mg BE litro⁻¹) fue similar a la de P, sin embargo, en la NF los valores de betacianinas (216.3 mg BE litro⁻¹) fueron más bajos que los de P y UF, considerando que la pulpa (entrada) fue diluida.

Cassano *et al.* (2010) obtuvo los valores más altos de betalainas con UF (32.8 mg BE litro⁻¹). El contenido de polifenoles fue concentrado en ambos procesos de membrana (UF y NF). Ellos también aplicaron UF a tunas cv. "Gialla" y usando otras membranas y condiciones de proceso -reportando valores más bajos de polifenoles totales (552.17 mg GAE litro⁻¹). Los resultados obtenidos para los diferentes extractos (P, UF, y NF) son debidos a la membrana y su interacción entre los diferentes extractos.

Esta clase de productos abren nuevas posibilidades para la producción de colorantes a partir de la tuna. Sin embargo, se requiere más investigación para mejorar la concentración de pigmento y otras propiedades de los extractos.

OTROS PRODUCTOS

Colorantes a partir de la tuna

Los colorantes naturales - en particular, rojo y morado - son altamente apreciados por los consumidores, debido a que los colorantes rojos sintéticos usados como aditivos de alimentos han sido restringidos por regulaciones oficiales en la Unión Europea y los Estados Unidos de América, por sus posibles efectos adversos a la salud humana (Tsuda *et al.*, 2001). Por lo tanto, existe un creciente interés

en las fuentes de pigmentos rojos naturales y sobre sus aplicaciones potenciales en alimentos.

Las variedades de tunas rojas y moradas poseen un contenido variable de betalainas en la pulpa y la cascara (Odox y Domínguez López, 1996; Sepúlveda *et al.*, 2003c). Este pigmento es comercialmente obtenido del betabel y es ampliamente usado en la industria alimentaria. Su uso es permitido por las regulaciones americanas y europeas (Sáenz *et al.*, 2009). El extracto rojo de betabel (rico en betalainas) es usado principalmente para colorear alimentos tales como; productos lácteos, dulces, helados, postres, bebidas y salchichas.

Sin embargo, este tiene algunas desventajas; el sabor terroso, impartido por la geosmina y la 3-sec-butil-2 metoxipirazina, y altos niveles de nitratos. Las tunas rojas y moradas son en consecuencia una alternativa interesante para la producción de colorantes para alimentos (Sáenz *et al.*, 2009; Castellar *et al.*, 2003). (**Figura 12**).

El uso del concentrado morado de jugo de tuna como colorante de alimentos para productos lácteos (e.g. yogurt) fue estudiado hace algunos años (Sáenz *et al.*, 2002d; Sepúlveda *et al.*, 2002, 2003c). Los tópicos actuales de investigación incluyen; purificación del pigmento y estabilidad, ambas características cruciales para aplicación en la industria

Castellar *et al.*, (2008) obtuvieron un concentrado de betalaina por fermentación (*Saccharomyces cerevisiae* var. Bayanus AWRI 796) de jugo de *O. stricta*. El producto final tuvo 9.65 g de betanina litro⁻¹, pH 3.41, 5.2°Brix y una viscosidad de 52.5 Cp.

Otros estudios se han enfocado en la deshidratación de la pulpa de tuna por secado-aspersión o



Figura 12
Tunas moradas y
micropartículas
(Fotos: C. Sáenz)

congelado-secado para obtener polvos colorantes. Mosshammer *et al.*, (2008) adoptaron la liofilización y el secado por aspersión con maltodextrina como vehículo (18-20 dextrosa equivalente DE) para deshidratar jugo de tuna "Giulla" (*O. ficus-indica*), reportando alta retención de betalainas ($\leq 90\%$) para ambas clases de polvo. De manera similar, se han secado por aspersión varias especies de tuna (*O. stricta*, *O. streptacantha* y *O. lasiacantha*), usando maltodextrina como vehículo secante (10, 20 DE). Díaz *et al.*, (2006) observaron que después de 24 semanas a 25°C, el polvo retuvo 86% del contenido original de betanina. Obon *et al.*, (2009) usaron jarabe de glucosa (29 DE) y reporto que después de 1 mes de almacenamiento a temperatura ambiente el polvo de color retuvo 98%. Rodríguez Hernández *et al.*, observaron que el polvo de tuna, cuando se reconstituye presenta un color ligeramente diferente al del jugo fresco.

La estabilidad de las betalainas es afectada por varios factores; pH, actividad del agua, exposición a la luz, oxígeno, actividad enzimática y sobre todo, la temperatura (Azeredo, 2009), Herbach *et al.*, 2006; Castellar *et al.*, 2003. La tecnología de microencapsulación está disponible para la estabilización de pigmentos (Sáenz *et al.*, 2009, 2012b; Gandía Herrero *et al.*, 2010; Vergara *et al.*, 2014; Robert *et al.*, 2015).

La microencapsulación es una técnica que implica la introducción de compuestos bioactivos (sólidos, líquidos o gaseosos) dentro de una matriz polimérica para protegerlos del ambiente, interacción con otros componentes del alimento o liberación controlada (Yáñez Fernández *et al.*, 2002). La microencapsulación de secado por aspersión es la técnica más ampliamente usada; que produce un polvo de baja actividad del agua, permitiendo un transporte más fácil, manejo y almacenamiento, mientras se asegura la calidad microbiológica (Hachiyashi, 1989).

Vergara *et al.*, (2014) combinaron la tecnología de membrana (para separar betalainas) y microencapsulación (para protegerlas), obteniendo un colorante saludable que puede ser usado en la industria de alimentos. Gómez (2013), estudio la estabilidad de micropartículas de betalainas en refrescos embotellados, comparando las micropartículas de la pulpa de tuna, y extractos ultrafiltrados y nanofiltrados; concluyendo que la estabilidad de las betalainas es afectada por la fuente (pulpa y extracto) y por el agente de encapsulación utilizado. Las betalainas de la pulpa de tuna son más estables en refrescos, probablemente gracias al mucilago. Alfaro (2014) agregó micropartículas de pulpa de tuna en yogurt, y reporto que después de 45 días de almacenamiento, se retuvo el 60% de las betalainas.

Actualmente existe alguna información sobre la encapsulación de betalainas de tuna (*O. ficus-indica*) (Sáenz *et al.*, 2009; Vergara *et al.*, 2014; Pitalua *et al.*, 2010; Gandía Herrero *et al.*, 2010; Robert *et al.*, 2015; Otárola *et al.*, 2015), pero se requiere más investigación.

Productos extruidos

La cocina por extrusión es una tecnología de alta temperatura en corto tiempo (HTST). Aunque ha habido pocos estudios relacionados con tuna y nopal, esta tecnología es aplicada ampliamente en procesos alimenticios, tales como los cereales para desayuno, botanas saladas y dulces, alimentos para bebé y alimentos ligeros. Los materiales alimenticios son plastificados y cocinados, combinando humedad, presión, temperatura y desgarramiento. Los factores que afectan la calidad del producto incluyen, tipo de extrusor, configuración de la broca, velocidad, temperatura y tasa de alimentación, así como la composición de la materia prima y el tipo de ingredientes alimenticios usados (Singh *et al.*, 2007), El Samahy *et al.*, 2007b).

El Samahy *et al.*, (2007b) estudio productos extruidos basados en tuna y arroz, una opción innovadora para la producción de nuevas botanas con valor agregado basadas en concentrados de pulpa de tuna. En este estudio se concentraron pulpas de tunas amarilla-anaranjadas y rojas (40°Brix), se les agregó harina de arroz y la mezcla se colocó en un extrusor de una sola broca. Se probaron diferentes formulaciones, variando la proporción de harina de arroz y concentrado de pulpa de tunas. Los niveles de sustitución de 5 y 10% de concentrado de tunas dieron los mejores resultados en los productos extruidos, con buenas características funcionales, nutricionales y sensoriales. La adición de concentrado de pulpa de tuna mejoró significativamente los pobres atributos sensoriales de la fórmula sin pulpa de tuna.

Sarkar *et al.*, (2011) extruyeron pulpa de tuna (variedad amarilla) con harina de arroz, probando diferentes proporciones de sólidos (sólidos de harina de arroz: sólidos de puré - 6:1, 8:1, y 10:1). Las mezclas fueron secadas en un extrusor con doble tornillo. Los resultados revelaron que algunas características como la porosidad disminuyeron cuando el nivel de fruta sólida aumentó.

La pulpa de tuna tiene potencial para la obtención de productos extruidos, se requieren más estudios para entender mejor el comportamiento de la pulpa de tuna en este proceso y para mejorar las características de los productos obtenidos.

Hidrocoloides o mucilagos de cladodios

Los hidrocoloides son polisacáridos de complejidad variable, son generalmente usados en la industria alimentaria como aditivos que proveen viscosidad a bebidas, pudines y aderezos para ensaladas. Estos incluyen el mucilago del nopal, un arabinogalactano tipo polisacárido que está presente en los cladodios y frutos del nopal (Sáenz *et al.*, 2004; Matsuhiro *et al.*, 2006). El mucilago tiene un importante papel fisiológico en las Opuntias ya que posee una alta retención de agua (Nobel *et al.*, 1992). Puede ser extraído de la matriz (cladodios o cascara de tunas) con agua, y se precipita con etanol, aunque se pueden también usar otras técnicas, tales como la compresión (Sepúlveda *et al.*, 2007). En general, los rendimientos extraídos son bajos ($\leq 2\%$ del peso fresco: PF), pero aun así son un prospecto interesante considerando que los cladodios o pencas se pueden obtener como residuos de poda y están disponibles todo el año. Se han reportado varios métodos de extracción usando diferentes solventes para precipitar el mucilago, tales como etanol, alcohol isopropílico y acetona (Rodríguez González *et al.*, 2014; Cai *et al.*, 2008; Sepúlveda *et al.*, 2007; Yahia *et al.*, 2009; Medina Torres *et al.*, 2000). Algunos estudios han investigado la aplicación de este hidrocoloide en néctares de fruta para reemplazar otros espesantes usados normalmente

por la industria alimentaria (e.g. CMC) (Sepúlveda *et al.*, 2003a; 2004).

El mucilago ha sido probado también como cobertura comestible para proteger frutas frescas. Del Valle *et al.*, (2005) usaron mucilago como película comestible para incrementar la vida de anaquel de fresas almacenadas a 5°C, reportando que las frutas mantuvieron su textura y sabor y que no ocurrió deterioro durante 9 días de almacenamiento. Esta película comestible podría ser una alternativa para la preservación de diferentes frutas frescas como las frutillas. Sin embargo, la aplicación a diferentes productos es un reto, porque la tasa respiratoria de cada fruto es diferente y debe de considerarse. Aquino *et al.*, (2009) usaron una solución de mucilago mezclada con diferentes concentraciones de ácido cítrico y bisulfito para inhibir la oxidación de rebanadas de plátano durante el proceso de secado. Estos autores reportaron que la combinación de 500 ppm de bisulfito de sodio y ácido cítrico (1%), seguidos de tratamiento con una solución de mucilago (35 mPas), inhibieron el oscurecimiento y confirieron una apariencia más brillante a las rebanadas.

Recientemente, Medina Torres *et al.*, (2013) y Otarola *et al.*, (2015) reportaron que el mucilago puede ser usado como un agente encapsulador para compuestos bioactivos: ácido gálico y betalainas, esto apunta hacia nuevas oportunidades en este sector industrial. Sáenz *et al.*, (2009) también reportaron que este comportamiento en un estudio de encapsulación de betalainas de tunas moradas.

Lira Ortiz *et al.*, (2014) extrajo pectinas de bajo metoxilo de la cascara de tunas blancas (*O. albicarpa* Scheinvar), y descubrió su potencial de uso en la industria de alimentos como agente espesante y gelificante - este último cuando se agregan iones de calcio -, estos autores obtuvieron un rendimiento de 98 g kg⁻¹ de materia seca.

Aceite de semilla

Las tunas contienen cantidades variables de semillas, pero usualmente están presentes una alta proporción (10-15 g 100 g⁻¹). En la mayoría de los procesos de la tuna, las semillas son separadas de la pulpa, obteniéndose como residuos grandes cantidades de semilla que pueden representar un problema ambiental. Por esta razón, en décadas recientes, los investigadores de varios países han estudiado la composición de la semilla y buscado posibles usos.

Sawaya *et al.*, (1993) estudiaron la composición de la semilla y su utilización potencial como alimento animal. Ellos reportaron que contenían 16.6% de proteína, 17.2% de grasa, 49.6% de fibra y 3.0 % de cenizas. El contenido mineral fue alto en sodio (67.6 mg 100 g⁻¹) potasio (163 mg 100 g⁻¹) y fósforo (152 mg 100 g⁻¹).



TABLA 5 Contenido de ácidos grasos (%) en el aceite de semillas de tuna (*O. ficus-indica*) de diferentes países

Acido graso	Países						
	Marruecos ^a	Turquía ^b	Sudáfrica ^a	Túnez ^{a,c,g}	Alemania ^d	Chile ^e	Algeria ^f
Palmitico (C16 : 0)	11.9	10.6-12.8	13.7	12.2-12.7	23.1	16.2	13.1
Estearico (C18 : 0)	3.4	3.3-5.4	3.38	3.2-3.9	2.67	3.3	3.5
Oleico (C18 : 1n-9)	21.3	13-23.5	15.7	16.4-22.3	24.1	19.9	16.3
Vaccenico (C18 : 1n-7)	–	5.1-6.3	–	4.8	–	–	5.3
Linoleico (C18 : 2n-6)	60.8	49.3-62.1	64.38	53.5-60.6	32.3	57.7	61.8

^a Gharby *et al.* (2015); ^b Mattháus y Özcan (2011); ^c Tlili *et al.* (2011); ^d Ramadan y Mörsel (2003a); ^e Sepúlveda y Sáenz (1988); ^f Chougui *et al.* (2013); ^g Ouerghemmi *et al.*, 2013.

El aceite de semilla de tuna es comestible; y podría convertirse en otro producto nutritivo y funcional de interés potencial en la industria alimentaria, pero quizá no para el consumo directo (como se indica más adelante). Para propósitos de investigación aceite es extraído usualmente con solvente orgánico (4.4-14.1%) (Sawaya y Khan, 1982; Sepúlveda y Sáenz, 1988; Ennouri *et al.*, 2005; Becerril 1997; Tlili *et al.*, 2011; Ouerghemmi *et al.*, 2013; Al Juhaimi, 2011). El uso de extracción por compresión en frío para extraer aceite fue reportado por Gharby *et al.* (2015) en Marruecos, con un rendimiento de 6-7%. Este tipo de extracción es más amigable al ambiente a que evita el uso de solventes orgánicos.

Los rendimientos de aceite comestible varían ente 6 y 17%, el cual en términos de los desechos producidos, se comparan razonablemente con los aceites de otras semillas oleaginosas. La producción de aceite de semilla de tuna como aceite comestible es viable únicamente dentro de un proceso integral, que aproveche todas las partes de la planta (Sáenz *et al.*, eds. 2006).

El aceite de semillas de tuna es rico en ácidos grasos no saturados y posee un alto contenido de ácido linoleico (57.7-73.4%) y bajo contenido de ácido linolenico. La **Tabla 5** muestra los porcentajes de los principales ácidos grasos de esta semilla. El aceite tiene alto contenido de ácidos grasos no saturados, así como otros compuestos saludables, como los esteroides, tocoferoles, vitamina E, β -caroteno y vitamina K (Ramadan y Morsel, 2003a; Kouba *et al.*, 2015). Los compuestos fenólicos fueron reportados por Tlili *et al.*, (2011) y Chougui *et al.*, (2013), 1 mg GAE 100 g⁻¹ y 268 mg 100 g⁻¹, respectivamente, expresados como equivalente de rutina. Investigadores de México y Taiwán reportaron valores más altos (Cardador Martínez *et al.*, 2011). Se requiere investigación adicional para obtener conclusiones definitivas en este tema.

Estas y otras propiedades químicas, incluyendo el índice de refracción, el valor de yodo y el número de saponificación, señalan la similaridad entre el aceite de semilla de tuna y otros aceites vegetales, tales como el aceite de maíz o el de semilla de uva. La concentración de aceite es baja comparada con otros aceites comestibles de oleaginosas comunes, el aceite de semilla de tuna podría, ser utilizado por la industria alimentaria para reemplazar grasas en productos especiales de dulcería. Sin embargo, los cosméticos y farmacéuticos serian mejores alternativas. En este contexto, las semillas de tuna también contribuyen con aceites esenciales, un grupo de compuestos usados principalmente por la industria farmacéutica. Ouerghemmi *et al.*, (2013) reportaron que los aceites esenciales comprenden, entre otros; terpenos, ésteres y aldehídos y que el rendimiento de aceite de las semillas de tuna es cercano al 4%.

En años recientes, han emergido otras aplicaciones, en particular para cosméticos, esta industria ha explotado las características del aceite de tuna (contenido de ácidos grasos no poliinsaturados, tocoferoles, esteroides y compuestos fenólicos) y en algunos países como Marruecos ha emergido una industria promisoría. Existen varias cooperativas y compañías privadas que extraen este aceite para uso en cosméticos, a esta actividad se dedican alrededor de 20 productores (Abderrahman Ait Hamou, ANADEC, Marruecos, comunicación personal). Estas industrias extraen el aceite por prensado en frío, un proceso amigable al ambiente que evita el uso de solventes (Berraaouan *et al.*, 2015; Gharb *et al.*, 2015). Previo a la extracción del aceite, las semillas se separan por medio de una maquina especial (**Figura 13**).

Figura 13
Separador
de semillas
(Foto: A. Ait-Hamou)



CONCLUSION

Existe un vasto espectro de alternativas para el proceso de tunas cladodios y semillas de la planta de nopal. En general, las tecnologías usadas están disponibles para usarse en empresas agroindustriales de pequeña escala, que podrían tomar ventaja de esta nueva materia prima para diversificar su producción. Si de otro modo, el objetivo es la creación de nuevas agroindustrias para el proceso del nopal a otro nivel, se requiere inversión por parte de gobiernos, ONGs u otras fuentes de financiamiento. En algunos países, se puede impulsar el modelo de cooperativas. La inmensa variedad de productos del nopal, así como subproductos puede beneficiar a mucha gente, en particular aquellas que viven en las zonas áridas y semiáridas del mundo.

Propiedades nutricionales y medicinales de frutos y cladodios de nopal

Mónica Azucena Nazareno

Centro de Investigación y Transferencia de Santiago del Estero

Consejo Nacional de Investigación Científica y Técnica

Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina



Propiedades nutricionales y medicinales de frutos y cladodios de nopal

INTRODUCCIÓN

La investigación científica ha confirmado que los frutos y cladodios del nopal pueden ser eficientemente usados como fuentes de nutrientes y fitoquímicos (e.g. azúcares, mucilago, fibras, vitaminas y pigmentos) de importancia nutricional y funcional. Los productos del nopal muestran características funcionales promisorias debido a sus propiedades promotoras de la salud. Este capítulo presenta una descripción detallada de los principales compuestos activos de las diferentes especies de nopal estudiadas en el mundo.

Desde la antigüedad, las plantas de nopal se han usado para curar enfermedades y heridas, los nopales son tradicionalmente usados como medicinas naturales en varios países para el tratamiento de numerosas enfermedades. Adicionalmente, los cladodios y tunas son todavía usados en la medicina tradicional como agentes terapéuticos. Se ha conseguido un progreso notable en las décadas recientes en la caracterización de los compuestos vegetales y sobre la explicación de las funciones de las moléculas naturales en la prevención de enfermedades. En este contexto, hay recomendaciones serias para incorporar las frutas y vegetales a la dieta. Actualmente se encuentran disponibles varios productos manufacturados en el mercado global que explotan las propiedades medicinales de la planta de nopal y existe interés creciente en el uso industrial de los productos del nopal como nutraceuticos.

Los nopales son plantas cultivadas multipropósito, no únicamente proveen alimento y forraje, también contienen fitoquímicos bioactivos. Las frutas y cladodios proveen energía y nutrientes para humanos y ganado. Asimismo, las plantas de

nopal son fuentes ricas de sustancias promotoras de la salud que pueden ser usadas como medicina natural que previenen y curan enfermedades serias. Estas propiedades benéficas del nopal están generando interés entre la comunidad científica. La literatura científica concerniente a las propiedades medicinales del nopal está en constante expansión, con nuevos descubrimientos reportados acerca de los constituyentes de las plantas responsables de esas actividades.

ASPECTOS NUTRICIONALES

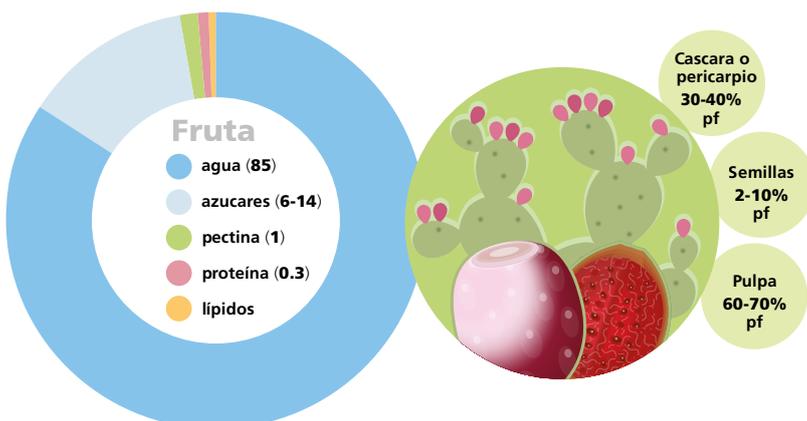
La composición nutritiva de las tunas y cladodios depende de muchos factores; especie, variedad, factores ambientales tales como condiciones edáficas, manejo del cultivo incluyendo fertilización y manejo postcosecha así como madurez.

Frutas

Muchas especies de cactus producen frutos comestibles. Actualmente la mayoría de las frutas de cactáceas disponibles en el mercado mundial pertenecen a la especie *Opuntia ficus-indica* conocidas como tunas o "cactus pears". El fruto típico del nopal es una baya ovalada con un peso promedio de 100 a 200 g. la pulpa es jugosa y constituye 60-70% del peso total del fruto y contiene numerosas semillas duras y pequeñas, que varían entre 100 a 400 por fruto. La **Figura 1** muestra la composición de la fruta. La tuna es una fruta no-climatérica, con baja tasa de respiración (Cantwell, 1995) y baja producción de etileno. De modo que la concentración de nutrientes permanece en el fruto sin cambios apreciables durante el almacenamiento, sin embargo, la firmeza y el peso pueden variar. Adicionalmente, el pH del fruto, acidez total y los sólidos solubles totales no varían durante el almacenamiento postcosecha, aunque se han reportado algunos cambios en el contenido de vitamina C, dependiendo de las condiciones de almacenamiento (Coria Cayupán *et al.*, 2009).

La composición nutricional de la tuna ha sido estudiada extensivamente (El Kosori *et al.*, 1998; Butera *et al.*, 2002; Feugang *et al.*, 2006). Los principales componentes son azúcares, fibra y mucilago y pectinas, y los de menor presencia son las proteínas, aminoácidos, vitaminas y minerales (Tesoriere *et*

Figura 1
Composición química de la tuna (% de materia seca) y constitución de la fruta en porcentaje de peso del fruto (El Kosori *et al.*, 1998; Duru y Turker, 2005).



al., 2005). Los metabolitos secundarios con propiedades antioxidantes han sido descritos (Kuti, 2004; Yahia y Mondragon, 2011; Coria Cayupan *et al.*, 2011). La tuna se caracteriza por su alto contenido de azúcar (12-17%) y baja acidez (0.03-0.12%) con valores de pH entre 5 y 7. Asimismo, los valores de sólidos solubles totales varían entre 11.6 y 15.3°Brix, incrementando con la madurez del fruto ; (Yahia y Mondragon, 2011). La proporción relativa de glucosa y fructosa varía entre especies y tejidos de la fruta: 53% de glucosa y 47 % de fructosa del total del contenido de azúcar (Kuti y Galloway, 1994). La pulpa es también rica en minerales tales como: calcio (59 mg 100 g⁻¹) y magnesio (98.4 mg 100 g⁻¹) Stintzing *et al.*, 2001). La cascara y la pulpa contienen mucilago en la fibra dietaria: este es un hidrocoloide que posee alta capacidad de absorción de agua. El contenido total de aminoácidos (257.24 mg 100g⁻¹) es más alto que el promedio de otras frutas, entre los principales se encuentran prolina, taurina y serina. En *O. ficus indica* se encuentran cantidades significativas de ácido ascórbico, variando de 180 a 300 mg kg⁻¹ de fruta fresca (Piga, 2004).

El tocoferol, la vitamina E soluble en grasa, se encuentra en la fracción lipídica de las semillas y la pulpa. Las isoformas homologas de la vitamina E, γ y δ -tocoferol son los constituyentes principales de los aceites de la semilla y la pulpa, respectivamente, constituyendo hasta el 80% del contenido total de vitamina E (Ramadan y Morsel, 2003a). Los lípidos se encuentran distribuidos entre la cascara, la pulpa y las semillas. La cascara del fruto contiene cantidades apreciables de ácidos grasos polinsaturados, en particular ácido linoleico. También contiene otros compuestos solubles en grasa, tales como los esteroides, beta-caroteno y vitamina K1; el principal esteroide es el β -sitosterol (Ramadan y Morsel, 2003 a) los polisacáridos y pectinas de la cascara fueron caracterizados por Habibi *et al.*, (2004).

Semillas y aceite de las semillas

La tuna contiene numerosas semillas de testa dura, que representan del 10 al 15% del peso de la pulpa. Aunque los frutos contienen muchas semillas su contenido de aceite es relativamente bajo, el contenido de aceite varía entre 7 y 15% del peso total de las semillas. Los ácidos grasos esenciales (Principalmente linoleico) representan un porcentaje significativo de los ácidos grasos polinsaturados de del extracto oleoso de la semilla. Los ácidos grasos insaturados alcanzan 80% del total de ácidos grasos (Ennouri *et al.*, 2005). El contenido de ácido linoleico varía entre 61.4 y 68.9%. La concentración de ácido α -linoleico en todos los cultivares es <1%. El ácido oleico varía entre 12.4 y 16.5%. Por lo tanto, aunque el contenido de aceite de la semilla es relativamente bajo, su composición de ácidos grasos indica que tiene potencial para usarse en la industrias de la salud y cosméticos. (Labuschagne y Hugo, 2010). El aceite de semilla se vende a precios muy altos como aceite orgánico para uso en la producción

de productos anti-envejecimiento y anti-arrugas. Nuevas aplicaciones están ahora bajo desarrollo en la industria de los cosméticos. El endospermo de la semilla está compuesto de polisacáridos ricos en arabinano, mientras que el principal componente de la cubierta de la semillas es D-xilano (Habibi *et al.*, 2002). El xilano ha sido usado como adhesivo y espesante y como aditivo en la industria de los plásticos, es también de creciente interés para la industria alimentaria debido a su potencial para usarlo en películas de empaque y para recubrir alimentos, también actúa como emulsificante y estabilizante proteico de espumas durante el calentamiento. Actualmente, puede jugar un papel importante en el desarrollo de productos novedosos en los sistemas de suministro de drogas, especialmente las de liberación lenta.

Cladodios

Los cladodios son tallos modificados aplanados con una forma ovoide característica, son capaces de ejercer acción fotosintética. Los cladodios tiernos, usualmente llamados nopalitos, son consumidos como hortaliza fresca, son usados en una gran variedad de platillos, incluyendo salsas, ensaladas, sopas, botanas, encurtidos, bebidas, dulces y postres (Saenz, *et al.*, 20012a). Los principales componentes de los cladodios son polímeros que contienen carbohidratos, que comprenden una mezcla de mucilago y pectina. La composición química de los nopalitos frescos fue reportada por Saenz *et al.*, (2002a):

- humedad 91% (peso del agua [w_w])
- carbohidratos totales 4.5%
- proteína 1.5% (w, en base seca [BS])
- grasa 0.2% (w_w BS)
- cenizas 1,3% (w_w BS), de los cuales el 90% es calcio

Guevara Figueroa *et al.* (2010) analizaron la composición proximal de los cladodios de *Opuntia silvestre* *Opuntia* spp. (**Figura 2**). Adicionalmente, 100 g de cladodios contienen 11 mg de vitamina C y 30 μ g de carotenoides.

El mucilago es un polisacárido, puede ser encontrado en células almacenadoras especializadas o libre en los espacios intercelulares de los tejidos parénquima y clorenquima de los cladodios. El mucilago seco contiene en promedio: 5.6% de humedad; 7.3% de proteína; 37.3%; cenizas nitrógeno 1.14%; calcio 9.86%; potasio 1.55% (Sepúlveda *et al.*, 2007). Con base en su composición química, el mucilago es considerado un polímero (similar a la pectina) compuesto de arabinosa, galactosa, xilosa y rhamnosa como azúcares neutrales, y de una pequeña cantidad de ácido galacturónico (Medina Torres *et al.*, 2000; Madjoub *et al.*, 2001). Además del consumo directo de nopalitos, los cladodios maduros se deshidratan y muelen para obtener harina y otros productos. La harina de nopal es una fuente rica en fibra dietaria que alcanza hasta 43% en base seca (Saenz, *et al.* 2002a), puede ser usada para fortificar recetas de alimentos conteniendo harinas de otras fuentes.



FITOQUIMICOS BIOACTIVOS DE LA PLANTA DE NOPAL

La planta de nopal es también una fuente importante de sustancias bioactivas y un excelente candidato para la preparación de alimentos funcionales y nutraceuticos. Los frutos, cladodios, semillas y flores tienen un alto contenido de constituyentes químicos valiosos que agregan valor a los productos del nopal.

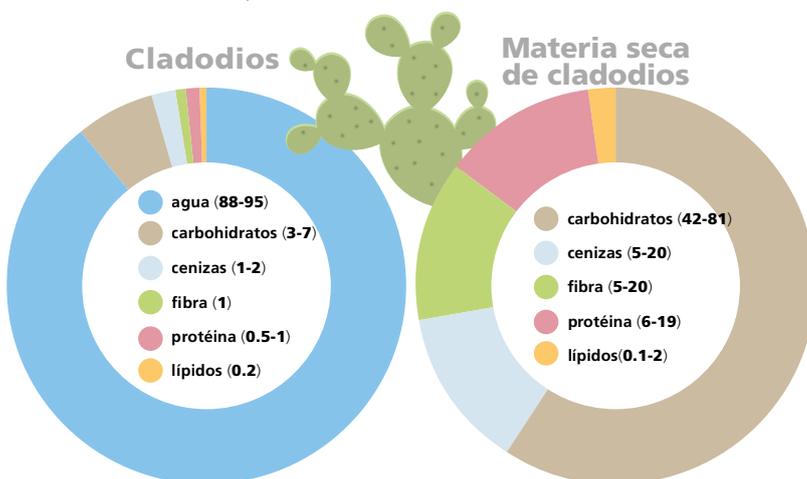
Frutos

Los frutos del nopal presentan alta actividad antioxidante, asociado a la presencia de vitamina C, flavonoides y betalainas (Galati *et al.*, 2003a; Kuti, 2004). La actividad antioxidante en los frutos es el doble de varias frutas, entre ellas: pera, manzana, tomate, plátano y uvas y es similar a la de las uvas rojas y toronjas (Butera *et al.*, 2002).

Las betalainas son pigmentos que contienen nitrógeno y pueden clasificarse en betacianinas rojas (e.g. betanina) y betaxantinas amarillas (e.g. indicaxantinas). Las betacianinas son conjugados de amonio del ácido betalámico con ciclo-DOPA; las betaxantinas son conjugados del ácido betalámico con aminoácidos o aminas. Las betalainas son los pigmentos prin-

cipales responsables del color de los frutos maduros y por lo tanto, son el factor principal de aceptación por el consumidor. La concentración de pigmentos depende de varios factores, en particular el estado de madurez del fruto (Coria Cayupan *et al.*, 2011; Stintzing *et al.*, (2005) caracterizaron la composición de las betalainas de la tuna. Estos pigmentos no únicamente proveen color; sus propiedades antioxidantes son mayores que las del ácido ascórbico (Butera *et al.*, 2002) en contraste con las antocianinas (otro grupo de pigmentos naturales rojos), las betalainas son más estables en un amplio rango de pH, por lo que son más apropiadas para usarse como colorantes de alimentos en productos de baja acidez (Stintzing *et al.*, 2001). Debido a su amplia variabilidad estructural asociada a la diversidad de colores, las betalainas constituyen una fuente promisoría de colorantes naturales para usarse como colorantes funcionales. Comparada con el betabel rojo, la tuna no únicamente ofrece un rango más amplio de colores, sino también presenta ventajas tecnológicas; ausencia de geosmin (un sabor terroso indeseable), bajos niveles de nitratos; y falta de contaminación por los microbios del suelo.

La presencia de fenoles también ha sido detectada en la pulpa de la tuna. Kuti (1982), reportó el efecto antioxidante debido a los principales flavonoides encontrados en el fruto del nopal (e.g. quercetin, kaempferol y derivados de isorhamnetina). Los derivados de flavonoles detectados en *Opuntia* spp., fueron revisados por Stintzing y Carle (2005). La cascara tiene un mayor contenido de fenoles que la pulpa (Stintzing *et al.*, 2005). Consecuentemente, desde el punto de vista funcional, es más ventajoso el proceso de ambos, cascara y pulpa. Lee *et al.*, (2002 a) encontró que los flavonoides de la tuna fueron también efectivos en la protección del ADN de un plásmido contra el daño inducido por radicales hidroxilos.



Cladodios

Se han encontrado otros componentes funcionales en los cladodios; tales como los derivados de la

Figura 2
Composición proximal del cladodio en porcentaje (Stintzing y Carle, 2005)

Figura 3
Principales fitoquímicos presentes en la fruta y los cladodios del nopal



clorofila, aminoácidos y flavonoides (**Figura 3**). Guevara Figueroa *et al.*, (2010), analizaron cladodios de nopales cultivados y silvestres de México y evaluaron los perfiles de polifenoles y flavonoides presentes en el muestras frescas y en productos procesados. Se observó la presencia de cinco flavonoides principales (isoquercetina, isorhamnetina-3-O-glucosido, nicotiflorina, rutina y narcisina) en todas las variedades, siendo predominante la nicotiflorina.

Flores

Las flores de nopal acumulan betalainas, así como también compuestos fenólicos incoloros (Ahmed *et al.*, 2005). La composición química de las flores de *O. ficus-indica* y *O. stricta* en la etapa 4 de floración fue estudiada por Ammar *et al.*, (2012), analizando las actividades antibacteriana y antifúngica de los extractos etanólicos y en hexano de las flores. El contenido de fenoles varía de forma marcada con la etapa de floración, y estos constituyentes activos muestran su máximo durante la etapa de postfloración. De Leo *et al.*, (2010) reportó el perfil químico del extracto metanólico de las flores de *O. ficus-indica*. La fracción volátil de tres especies de *Opuntia* obtenida por destilación acuosa fue caracterizada y ensayada como agentes antifúngicos (Bergaoui *et al.*, 2007).

PROPIEDADES MEDICINALES

La planta de nopal ha sido usada por civilizaciones antiguas por miles de años para tratar enfermedades y curar heridas. Los orígenes y la historia del nopal como medicina están por lo tanto ligados a las antiguas civilizaciones latinoamericanas. Por más de 12 000 años los nopales tiernos han sido consumidos por los mexicanos por sus cualidades nutritivas y propiedades curativas. Los cladodios, las frutas, semillas y flores han sido usados en la medicina tradicional en varios países a través de los siglos.

Existen numerosos reportes que indican que la dieta rica en frutas y vegetales está ligada con baja incidencia de enfermedades coronarias y algunos tipos de cáncer; esto sugiere que esta clase de dieta tiene efectos positivos sobre la salud (Bazzano *et al.*, 2002). Estos efectos benéficos están asociados no únicamente con el contenido de nutrientes y vitaminas de los alimentos sino con la acción de ciertos componentes bioactivos. Los fitoquímicos con propiedades antioxidantes promueven una buena salud protegiendo contra el daño oxidativo inducido por especies reactivas de oxígeno (Prakash y Gupta, 2009).

Varios estudios han demostrado que los frutos y cladodios del nopal poseen altos niveles de nu-

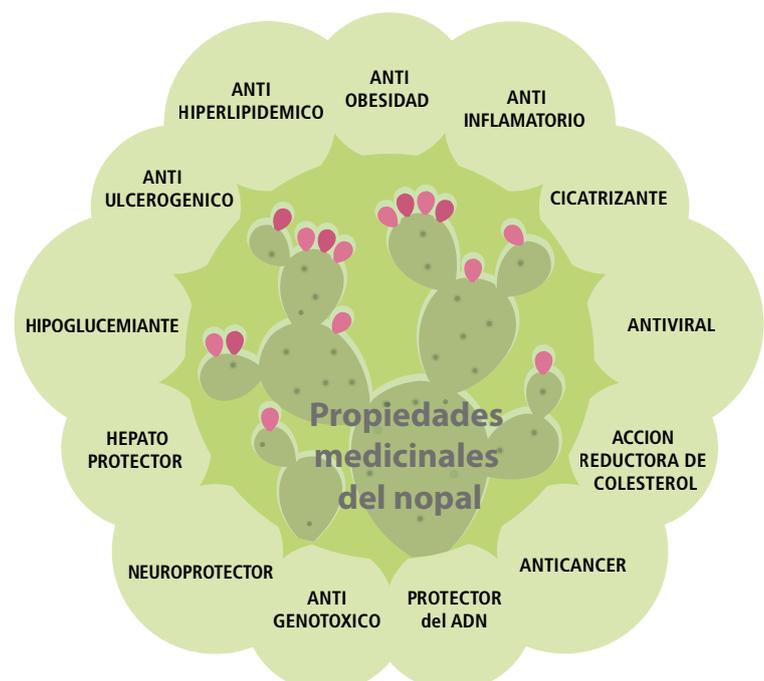
trientes importantes, minerales y vitaminas, así como antioxidantes. La planta de nopal parece ser una fuente excelente de fitoquímicos de importancia nutraceutica (El Mostafa *et al.*, 2014). Esta planta puede ser completamente utilizada dado que es factible de extraer compuestos bioactivos de sus diferentes partes: flores, frutos, semillas, cladodios y raíces (Nazareno, 2014). La **Figura 4** resume las propiedades medicinales más relevantes asociadas a los productos del nopal.

Frutas

La suplementación de la dieta humana con tunas reduce el estrés oxidativo, mejorando el status oxidativo general. El efecto de las betalainas de la tuna en el estrés oxidativo en humanos fue estudiado por Tesoriere *et al.*, (2003, 2004, 2005a), quienes reportaron que la ingestión de tuna produce una reducción de los indicadores de estrés oxidativo, inhibición de la oxidación de LDL y aumento de la resistencia a hemólisis oxidativa de los glóbulos rojos de la sangre en experimentos *ex vivo*. Budinsky *et al.*, (2001) mostraron que el consumo regular de *O. robusta* redujo el daño causado por la oxidación.

Zou *et al.* (2005) estudiaron la capacidad de la tuna para suprimir la carcinogénesis en cultivos de líneas celulares humanas *In vivo* y en animales modelo *In vivo*. Los resultados mostraron que los extractos de nopal inhibieron el crecimiento *In vivo* de células de cáncer de ovarios, vejiga y cervicales y suprimieron el crecimiento de tumores en animales inoculados con células cancerosas del ovario. Los efectos antiproliferativos de la betanina en líneas celulares con leucemia mieloide crónica K562

Figura 4
Propiedades medicinales del nopal



fueron reportados por Sreekanth et al., (2007). Los extractos de *O. humifusa* fueron ensayados contra líneas celulares de cáncer del seno y glioblastoma humano (Hahm et al., 2010). Estudios recientes con extractos de nopal indican actividad anticancer notable. La actividad quimio preventiva y anticáncer de los extractos crudos de plantas que pertenecen a la familia de las Cactáceas, así como de sus principales componentes fue bien revisada por Harley et al., (2013).

Los estudios in vitro de la interacción entre betalainas purificadas y el ácido hipocloroso y la mieloperoxidasa humana revelaron la acción antiinflamatoria de los pigmentos de la tuna (Allegra et al., 2005). Recientemente se reportaron notables efectos antiinflamatorios de la indicaxantina en un modelo animal (Allegra et al., 2014). Los efectos antiulcerogénicos y antigastritis han sido estudiados en ratas por Lee et al., (2001) y Galati et al., (2003). La hepatoprotección del jugo y extracto de tuna (*O. ficus-indica*) fue demostrado en ratas (Galati et al., 2005; Alimi et al., 2012). Kim et al., (2006) demostraron la acción neuroprotectora de los extractos de tuna (*O. ficus-indica*) contra daños oxidativos neuronales inducidos por excitocinas en células corticales de ratones. Estos autores también reportaron resultados de experimentos In vivo con extractos metanólicos de frutas redujeron los daños neuronales producidos por isquemia global en gerbillos en un 36%, estos efectos fueron adscritos a la acción antioxidante de los bioflavonoides. Wolfram et al., (2002) reportó que la ingestión de 250 g al día⁻¹ de frutas de *O. robusta* produjo un efecto antihiperlipidémico y una acción reductora del colesterol en humanos no diabéticos hiperlipidémicos, también hay reportes de efectos en el metabolismo de la glucosa. La acción hipocolesterolemica puede ser explicada parcialmente por el contenido de fibra (pectina) de los frutos. Aunque el mecanismo hipoglucémico todavía no es claro, las investigaciones indican que este puede deberse a que las frutas promueven - en diabéticos y no diabéticos - una mejor y más rápida entrada de la glucosa a la célula, y se sospecha también una mejora de la sensibilidad celular a la insulina. El mejoramiento del funcionamiento de las plaquetas debido al consumo regular de nopal (250 g día⁻¹) en voluntarios sanos y pacientes con hipercolesterolemia heterocigótica familiar leve fue descrito por Wolfram et al., (2003). La ingestión de fruta induce acciones benéficas sobre el sistema cardiovascular reduciendo la acción de las plaquetas y mejorando el balance hemostático.

Cladodios

Cuando se les suministraron cladodios (*O. ficus-indica*) a ratas hipercolesterolemicas, se encontró una marcada disminución de los niveles de colesterol y triglicéridos en muestras de plasma. Un efecto antihiperlipidémico y de reducción del colesterol fue también observado en conejillos de indias, ratas y ratones (Galati et al., 2003); Oh y

Lim, 2006). Los experimentos con pacientes de diabetes mellitus no-insulino dependientes confirmaron los efectos hipoglucémicos de los cladodios de *O. streptacantha*.

Asimismo, el consumo de nopalitos redujo la obesidad y la glucosa de la sangre. El factor antiobesidad, la acción hipoglucemiante y efectos antidiabéticos fueron observados en ratas y humanos (Bwititi et al., 2000; Frati Munari et al., 2004; Yang et al., 2008).

Galati et al., (2001) propusieron que los cladodios de *O. ficus-indica* estimulan la respuesta protectora de la mucosa gástrica, previniendo el desarrollo de úlceras inducidas por el etanol (tratamiento preventivo). El efecto citoprotector de los cladodios de nopal fue adscrito a las propiedades fisicoquímicas del mucilago. Los cladodios de *O. ficus-indica* producen citoprotección incrementando la secreción de moco en la mucosa gástrica de ratas afectadas por úlceras inducidas por alcohol (Galati et al., 2002). La administración de cladodios es recomendada como tratamiento preventivo y curativo de úlceras gástricas (Lee et al., 2002a). Los extractos de la planta de nopal pueden aliviar los síntomas de resaca alcohólica en humanos (Wiese et al., 2004).

Asimismo, el efecto protector del jugo de cladodio (*O. ficus-indica*) contra la toxicidad inducida de níquel fue reportado por Hfaiedh et al., (2008). Se ha encontrado que la exposición experimental a níquel genera especies reactivas de oxígeno (ROS) conduciendo a la peroxidación de lípidos, pérdida de integridad de membranas y alteraciones del sistema celular antioxidante. Existen indicaciones de que el jugo de cladodio puede prevenir el estrés oxidativo y reducir los parámetros relacionados a este en ratas, del mismo modo la ingestión regular de jugo de cladodio puede contrarrestar el efecto peroxidativo del níquel. Efectos protectores similares contra el daño oxidativo inducidos por varios tóxicos fueron también reportados por Ncibi et al., (2008) y Zourgui et al., (2008). La acción neuroprotectora contra daños oxidativos neuronales de los extractos de flavonoides también fue sido evaluada; los autores encontraron que fueron efectivos en cultivos de células corticales y contra isquemia global en gerbillos (Kim et al., 2006).

Los extractos de cladodio podrían tener un efecto hepatoprotector contra aflaxotoxicosis en ratones, probablemente actuando mediante la promoción de sistemas de defensa antioxidativa (Brahni et al., 2011). Se ha reportado experimentos concernientes a la acción antiviral de los extractos de nopal. Un extracto de cladodio de *O. streptacantha* exhibió propiedades antivirales contra virus ADN, tales como el del herpes, y contra virus ARN tales como el de la influenza tipo A y el virus de la inmunodeficiencia adquirida (HIV1). El principio activo fue localizado en el tejido exterior no cuticular adscrito a una proteína con modo de acción desconocido (Ahmad et al., 1996). La replicación de ambos virus - ADN y ARN- fue inhibida. Existe una



TABLA 1 Propiedades medicinales de los productos del nopal

Especie de nopal, parte y actividades	Sistemas estudiados y referencias
Acción antiviral	
<i>O. streptacantha</i> extracto de cladodio	Inhibición de la replicación viral intracelular e inactivación extracelular del virus (Ahmad <i>et al.</i> , 1996)
<i>Opuntia</i> sp. cladodios	Conejillos de indias (Fernández <i>et al.</i> , 1994)
Efecto anti-hiperlipidémico y reducción del nivel de colesterol	
<i>O. robusta</i> frutos	Hiperlipidemia no-diabética en humanos (Wolfram <i>et al.</i> , 2002)
<i>O. ficus-indica</i> cladodios	Ratas (Galati <i>et al.</i> , 2003b)
<i>O. ficus-indica</i> semillas y aceite de semillas	Ratas (Ennouri <i>et al.</i> , 2006a, b, 2007)
<i>O. ficus-indica</i> var. Saboten	Ratones (Oh y Lim, 2006)
Factor antiobesidad	
<i>Opuntia</i> sp. cladodios	Humanos (Fрати Munari <i>et al.</i> , 2004)
<i>O. megacantha</i>	Ratas diabéticas (Bwititi <i>et al.</i> , 2000)
<i>O. lindheimeri</i>	Cerdos diabéticos (Laurenz <i>et al.</i> , 2003)
Efectos hipoglucemiantes y antidiabéticos	
<i>O. ficus-indica</i> , <i>O. lindheimeri</i> y <i>O. robusta</i> frutos	Ratas diabéticas (Enigbocan <i>et al.</i> , 1996)
<i>O. streptacantha</i>	Humanos (Meckes Lozyoa, 1986)
<i>O. monacantha</i> extracto de cladodio	Ratas diabéticas (Yang <i>et al.</i> , 2008)
<i>O. ficus-indica</i> semillas y aceite de semillas	Ratas (Ennouri <i>et al.</i> , 2006a, b)
<i>O. streptacantha</i>	Humanos (Fрати Munari <i>et al.</i> , 1992)
<i>O. filiginosa</i> extracto de fruto	Ratas (Trejo González <i>et al.</i> , 1996)
Acciones antiinflamatorias	
<i>O. humifusa</i> extractos <i>O. ficus-indica</i> indicaxhantina	Células macrófagas productoras de ácido nítrico (Cho <i>et al.</i> , 2006); rata pleurisia (Allegra <i>et al.</i> , 2014)
Propiedades sanatorias	
<i>O. ficus-indica</i> cladodios	Humanos (Hegwood, 1990)
Neuroprotección	
<i>O. ficus-indica</i> var. Saboten extractos	Células primarias corticales cultivadas (Dok Go <i>et al.</i> , 2003)
<i>O. ficus-indica</i> extractos de fruto	Estudios in vitro de células corticales de ratón cultivadas y estudios in vivo en gerbillos (Kim <i>et al.</i> , 2006)
Efectos antiulcerogénicos y antigastritis	
<i>O. ficus-indica</i> cladodios	Ratas (Galati <i>et al.</i> , 2001, 2002)
<i>O. ficus-indica</i> jugo de tuna	Ratas (Galati <i>et al.</i> , 2003a)
<i>O. ficus-indica</i> var. Saboten tallos	Ratas (Lee <i>et al.</i> , 2002a)
<i>O. ficus-indica</i> fruto	Ratas (Lee <i>et al.</i> , 2001)
Reducción del efecto del estrés oxidativo en humanos	
<i>O. ficus-indica</i> frutos	Humanos (Tesorieri <i>et al.</i> , 2004); LDL humano in vitro (Tesorieri <i>et al.</i> , 2003) células humanas in vivo (Tesorieri <i>et al.</i> , 2005b)
<i>O. robusta</i> frutos	Humanos (Budinsky <i>et al.</i> , 2001)
Alivio de síntoma de resaca	
<i>O. ficus-indica</i> extracto de planta	Humanos (Wiese <i>et al.</i> , 2004)
Protección contra toxicidad por níquel	
<i>O. ficus-indica</i> extracto de cladodio	Ratas (Hfaiedh <i>et al.</i> , 2008)
Protección contra daño oxidativo inducido por zearalenona	
<i>O. ficus-indica</i> cladodio	Ratones (Zourgui <i>et al.</i> , 2008)
Efecto diurético	
<i>O. ficus-indica</i> cladodios, flores y frutos no comerciales	Ratas (Galati <i>et al.</i> , 2002)



(continuación)

Especie de nopal, parte y actividades	Sistemas estudiados y referencias
Reducción del daño al ADN	
<i>O. ficus-indica</i> extracto de fruta	Humanos linfocitos periferales (Siriwardhana <i>et al.</i> , 2006)
Propiedades preventivas del cancer	
<i>O. ficus-indica</i> extractos acuosos de frutas	Células epiteliales cervicales y de ovarios, así como ovario, cervicales, cancerosas de la vejiga (Zou <i>et al.</i> , 2005), células cancerosas del ovario (Feugang <i>et al.</i> , 2010); l líneas celulares de leucemia (Sreekanth <i>et al.</i> , 2007)
<i>O. humifusa</i> extractos de fruto	Líneas celulares de cáncer de seno y glioblastoma humano (Hahm <i>et al.</i> , 2010; Harlev <i>et al.</i> , 2013)
<i>Opuntia</i> spp. jugo de frutos	Células cancerosas de próstata, colon, mamarias y hepáticas (Chavez Santoscoy <i>et al.</i> , 2009)
<i>Hylocereus</i> spp. extractos	Acción antiproliferativa in vitro (Kim <i>et al.</i> , 2011; Wu <i>et al.</i> ; Jayakumar y Kanthimathi, 2011)
<i>O. humifusa</i> polvo de frutos	Reducción en el número de papilomas e hiperplasia epidermal en ratones (Lee <i>et al.</i> , 2012)
Protección hepática	
<i>O. ficus-indica</i> jugo y extracto de fruta	Hígado (Galati <i>et al.</i> , 2005; Alimi <i>et al.</i> , 2012; Brahmi <i>et al.</i> , 2011; Ncibi <i>et al.</i> 2008)
Capacidad anticlastogénica	
Jugo de fruto de <i>nopal</i>	Ratones (Madrigal Santillán <i>et al.</i> , 2013)
Incremento de densidad ósea	
<i>O. humifusa</i> cladodios congelados secos	Ratas (Kang <i>et al.</i> , 2012)
Mejoramiento de la sensibilidad a insulina	
<i>O. humifusa</i> cladodios congelados secos	Ratas (Kang <i>et al.</i> , 2013)



patente internacional¹ que sostiene que el nopal posee un efecto contra los virus del herpes simplex y de la influenza A. se ha propuesto que los derivados de la clorofila son los compuestos activos.

PERSPECTIVAS

Los nopales pueden ser considerados como una fuente importante de sustancias bioactivas y candidatos excelentes para la preparación de alimentos funcionales y nutraceuticos. Los datos científicos revelan un alto contenido de algunos constituyentes químicos de frutos, cladodios, semillas y flores, que pueden agregar valor a los productos del nopal. Adicionalmente, algunos compuestos muestran características promisorias como sustancias promotoras de la salud. Existen varios productos manufacturados disponibles en el mercado de los nutraceuticos beneficiándose de los propiedades medicinales de la planta de nopal. Los frutos son procesados para preparar dulces, jarabes, mermeladas y jaleas. El jugo de la tuna puede ser usado para curar resacas. El jugo natural de la tuna es promovido como una bebida refrescante rica en vitamina C, flavonoides y antioxidantes, así como un agente antienviejecedor y

antiinflamatorio. Es también considerado para promover la salud celular y desintoxicar el cuerpo. Existe potencial para continuar explotando las propiedades funcionales de los productos del nopal en la industria alimentaria, de los cosméticos y farmacéuticos, pero se requiere más investigación en estos campos. Aunque se ha logrado un progreso significativo, todavía queda mucho por explorar. Los cladodios de nopal poseen propiedades promotoras de la salud y han sido ofrecidos deshidratados para preparar capsulas y tabletas. El aceite de semilla, por otro lado es usado en cosméticos. La creciente demanda global por productos nutraceuticos y promotores de la salud es acompañada por el desarrollo de productos naturales para el tratamiento y prevención de las enfermedades humanas.

Se requieren más estudios para encontrar nuevos compuestos activos y sus aplicaciones industriales y farmacéuticas. Adicionalmente, las formulaciones antioxidantes deben ser probadas en la búsqueda de posibles efectos sinérgicos entre componentes. La demanda del mercado debe ser estimulada publicitando estas propiedades del nopal. Aunque las propiedades benéficas de los nopales han sido conocidas desde la antigüedad, estas solo han sido probadas por la ciencia recientemente.

¹ Patente internacional (1993): Skinner y Ezra (GB, Israel). *Nopal cactus effect on herpes simplex and influenza A viruses*

El nopal en los ecosistemas, bienes y servicios

Mounir Louhaichi^a, Ali Nefzaoui^b y Juan Carlos Guevara^c

^a Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas Amman Jordania

^b Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas. Túnez, Túnez

^c Instituto Argentino para la Investigación de Tierras Áridas. Mendoza, Argentina



INTRODUCCIÓN

La familia Cactaceae incluye cerca de 1600 especies nativas de América que se han diseminado mundialmente. *Opuntia* es el género más ampliamente conocido de esta familia y *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Es cultivada en más de 20 países (Nefzaoui *et al.*, 2014). Los nopales son cultivados en 2.6 millones de ha alrededor del mundo y son principalmente usadas como forraje o pastura: en Túnez (600 000 ha), México (230 000 ha) y Argelia (150 000 ha) (Nefzaoui y Ben Salem, 2006); en Sudáfrica (525 000 ha) y Etiopía (355 000 ha) (Reveles Hernández *et al.*, 2010); en Brasil (>600 000 ha) (Torres Sales, 2010); y en el sur de Marruecos (90 000 ha) (Anegay y Boutoba, 2010). En Argentina, el área cultivada con nopal se estima en 10 000 ha para forraje y producción de frutos, con jarabe como un producto secundario (Dubeux *et al.*, 2013); el área cultivada de *Opuntia* solamente para producción de tunas fue de 2 000 ha en 2003 (Ochoa, 2006).

Las temperaturas frías del invierno son la principal limitante para el cultivo de nopal en partes de Argentina y el norte de México (Borrego Escalante *et al.*, 1990), la Cuenca Mediterránea (Le Houérou, 1996b) y el sureste de Estados Unidos de América (Parish y Felker, 1997). Bajo un intervalo de condiciones climáticas, el límite térmico para las especies sensibles a heladas tales como *O. ficus-indica* es indicado por una temperatura mínima promedio en el mes más frío de 1.5-2°C (Le Houérou, 1995). Los nopales y otras plantas tolerantes a sequía y arbustos forrajeros eficientes en el uso del agua pueden sobrevivir con tan poco como 50 mm de lluvia en un año, pero sin crecimiento o producción. El requerimiento mínimo para el establecimiento exitoso de las plantaciones de nopal de temporal, es de 100 a 150 mm de lluvia en promedio anual (Le Houérou, 1994); previstos con suelos de tipo arenoso y profundos (Le Houérou, 1996a). Una estrategia para mitigar los efectos de la sequía en varios sistemas de producción animal en varias zonas áridas y semi-áridas del mundo es el establecimiento de reservas de amortiguamiento de alimentación, con plantaciones de arbustos forrajeros tolerantes a sequía y eficientes en el uso de agua, en particular especies de *Opuntia* (Le Houérou, 1991). Los nopales tienen un uso eficiente del agua, gracias al ruta fotosintética del metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM) (Han y Felker, 1997; Nobel, 1991, 1994); por esta razón, están especialmente adaptadas para la producción de forrajes en las zonas áridas.

Las *Opuntias* pueden tolerar la sequía prolongada, altas temperaturas, viento y suelos erosionados. Esta habilidad, más el amplio intervalo de usos económicos, las hacen ideales para el desarrollo de la agricultura en áreas afectadas por los dos problemas ambientales más importantes actualmente: desertificación y cambio climático (Nefzaoui y El Mourid, 2008).

“Humilde”, “agresivo”, “oro verde”, “joya verde”, “fruto del pobre”, “fruto de espinas y delicias”, “tesoro precioso”, “tesoro bajo las espinas”, “dromedario del mundo vegetal”, “planta del futuro” y “árbol monstruoso”, son solo algunos de los muchos nombres usados para describir la planta y fruto del nopal (*Opuntia* spp.). Estos nombres reflejan lo que la (tuna) significa para aquellos que trabajan o viven con una planta apreciada y amada por muchos, pero temida y odiada por otros. En cualquier caso, esta “humilde planta” continúa callada pero firmemente, ganándose y liderando un lugar en programas dirigidos al desarrollo agrícola de áreas áridas y semi-áridas de muchos países.

Los nopales, endémicos de América, fueron incorporados a muchas culturas nativas de América. Por ejemplo, el nopal (*Opuntia* spp.) es uno de los recursos más importantes en áreas áridas y semi-áridas de México, donde ha influido en su cultura, historia y tradiciones. En la vida social, económica y religiosa de los Aztecas, la planta jugó un papel muy importante y el símbolo de la Gran Tenochtitlán (ahora Ciudad de México) fue un águila sobre un nopal devorando una serpiente. Este símbolo está incorporado ahora al emblema nacional mexicano. *Opuntia* está también ligado con los sentimientos de unidad nacional en México y es frecuentemente asociado con la virgen de Guadalupe y el Santo Indio Juan Diego.

La tuna es ahora parte del ambiente natural, y se ha integrado a la cultura de muchos países donde está bien adaptada a zonas que se caracterizan por la sequía, lluvias erráticas y suelos pobres expuestos a la erosión. Está naturalizada en el paisaje como parte de la flora local, como puede verse en postales y anuncios turísticos en Italia, España, Marruecos, Israel, Kenia, Yemen y Arabia Saudita. Notablemente, Lorenzo Bernini (1598-1680) incluyó el nopal en la fuente de los Cuatro Ríos en la Plaza Navona en Roma, donde es representado el Río de la Plata.

La controversia sobre si una planta es benéfica o dañina depende de la especie, de dónde y cómo crece,

y a quien se aplica. Hay aseveraciones contradictorias, ciertas en algunos casos y no en otros, basadas en experiencias bajo diferentes condiciones ecológicas, económicas y sociales. Diferentes situaciones pueden cambiar dependiendo de la realidad individual. Por ejemplo, en Australia y Sudáfrica, se usó control biológico para detener su expansión e incluso exterminarla en ciertas áreas. Por otro lado, en Etiopia y Eritrea, donde el clima es adecuado y no existen enemigos naturales, el nopal invadió efectivamente miles de hectáreas después de su introducción hace >150 años. En cualquier caso, mientras que podría afectar los recursos genéticos de las plantas locales, la realidad actual es que después de tantos años, la gente ha desarrollado una dependencia económica sobre los productos y alimentos del nopal, independientemente de si la introducción del nopal fue una maldición o una bendición. Su potencial para adaptarse y rápida expandirse en áreas silvestres o en áreas previamente perturbadas por la intervención humana, es otro tema que debe ser examinado. El nopal es más que útil: es una planta vital que ha sido llamada “un cultivo que salva vidas humanas y animales”, especialmente en tiempos de sequía (Arias Jimenez, 2013b).

THay numerosas razones detrás de la expansión de *Opuntia* spp. alrededor del mundo, particularmente *O. ficus-indica*, incluyendo:

- requiere prácticas de cultivo simples para hacer obtener la cosecha;
- rápido establecimiento luego de introducirla a una nueva área;
- prácticas fáciles de multiplicación que favorecen una rápida difusión e intercambio de material entre usuarios;
- la habilidad de crecer en varias condiciones adversas caracterizadas por altas temperaturas, falta de agua y suelo pobre;
- generación de ingresos de la venta de frutos muy valorados y apreciados;
- uso de tallos en la dieta humana y como forraje para ganado;
- el despliegue de plantas es útil para cercar las granjas;
- los jugos del fruto tienen valor nutricional;
- los frutos tienen una vida larga de anaquel; y
- existe una amplia variedad de derivados industriales del fruto.

Estos y otros factores han contribuido a tan amplia distribución, de sus regiones de origen en Latinoamérica a áreas remotas, abarcando continentes, culturas y tradiciones.

Objetivo principal de este capítulo

A pesar de su importancia ecológica, económica y

social *Opuntia* (tuna) continúa recibiendo atención limitada científica, política y mediática. Plantaciones bien mantenidas generan beneficios y bienes y servicios ambientales: pueden jugar un papel mayor, no sólo en términos de incrementar la biodiversidad y el secuestro de carbono, sino con respecto a la conservación del paisaje y naturaleza, mitigación de la erosión del suelo, protección del agua y herencia cultural. Sin embargo, estos servicios públicos no tienen un precio en el mercado, son difíciles de desagregar, están altamente interrelacionados en formas dinámicas complejas y son difíciles de medir. Los lazos fuertes entre la producción de tuna y la provisión de diversos bienes y servicios, especialmente en áreas marginales, necesitan ser considerados e integrados al marco de evaluación estandarizado de los impactos ambientales de la producción agrícola. **El objetivo principal de este capítulo es resaltar los beneficios generados de la producción de tuna.**

MEJORAMIENTO DE PASTIZALES

El mejoramiento de pastizales usando cactáceas sin espinas ha sido practicado desde principios de 1930-1940s, principalmente en el norte de África. Le Houérou (2002) informó que las plantaciones de forraje se desarrollaron sistemáticamente, especialmente en Túnez, tras la investigación realizada por Griffiths y sus colaboradores en Texas, Estados Unidos de América. Griffiths fue invitado por el Gobierno de Túnez en 1932 y su experiencia de 30 años con el uso de cactus como forraje se ha aplicado desde entonces en el centro de Túnez para mitigar los efectos de la sequía en el ganado. El desarrollo del cactus para forraje fue fuertemente apoyado por el Gobierno. Se autorizaron asignaciones de tierras condicionales en el centro de Túnez con la condición de que los beneficiarios contratantes plantaran el 10% de la tierra asignada con cactus sin espinas. Esto serviría como reserva de emergencia para cultivos forrajeros permanentes, que serviría de amortiguador en tiempos de escasez de forraje. Este fue un movimiento estratégico ya que el país enfrentó 3 años de sequías severas desde 1946 hasta 1948, durante las cuales el ganado fue diezmado en un 70-75%. Las pérdidas de ganado fueron menores para quienes tenían plantaciones de cactus (Le Houérou, 2002).

La plantación de nopal es aplicable en muchos entornos, particularmente donde el ambiente es demasiado limitado o desafiante para los cultivos agrícolas tradicionales o donde la tierra necesita rehabilitación. El nopal se recomienda dondequiera que los suelos sean muy poco profundos, demasiado pedregosos, demasiado empinados o demasiado arenosos, o cuando el clima es demasiado seco para la práctica de la agricultura. Como resultado, tiene un papel clave en las estrategias de rehabilitación

para mejorar las áreas de pastizales, matorrales, matorrales o zonas agrícolas pobres. Para la rehabilitación, la densidad de siembra es de 1 000-2 000 cladodios o tallos simples o dobles por hectárea, con un espaciado de 5-7 m entre hileras y 1-2 m dentro de hileras. La fertilización, la poda y el tratamiento de plagas/enfermedades generalmente no se aplican, pero pueden hacerse para mejorar la productividad. Ocasionalmente, si el primer año es demasiado seco, se aplica irrigación suplementaria durante el establecimiento. Las plantaciones son explotables después de 3-4 años y crecieron completamente después de 7-10 años; pueden seguir siendo productivos durante > 50 años con un buen manejo. Dado que *Opuntia* puede sobrevivir con un manejo mínimo, se recomienda en programas de rehabilitación.

El manejo intensivo no es un requisito previo para la supervivencia del cactus, pero una plantación puede alcanzar altos niveles de productividad si se aplican las prácticas de apropiación. La productividad de los pastizales sembrados con cactus puede incrementarse en un factor de 1 a 10 cuando los pastizales están muy degradados y de 1 a 5 cuando los pastizales están en buenas condiciones (Le Houérou *et al.*, 1991). Nefzaoui y El Mourid (2009) compararon la productividad de los pastizales en el centro de Túnez cuando fueron rehabilitados con cactus (*Opuntia ficus-indica*) y arbustos de crecimiento rápido (*Acacia cyanophylla*). La rehabilitación con cactus (*O. ficus-indica*) llevó a mayores tasas de productividad que la rehabilitación con arbustos de crecimiento rápido (*A. cyanophylla*) (Tabla 1).

Pocas especies de plantas son capaces de aumentar la productividad de la tierra a la alta tasa mencionada anteriormente, particularmente en el caso de tierras marginales. Los nopales pueden, - debido a su eficiencia de uso de la lluvia (EUL). De hecho, los pastizales mediterráneos degradados tienen una EUL de 1-3 kg de MS ha⁻¹ año⁻¹ mm⁻¹, los pastizales en buen estado exhiben una EUL de 4-6, y los pastizales degradados pueden tener una EUL tan baja como 0.1-0.5 (Le Houérou, 1984). En contraste, los pastizales rehabilitados

con *Opuntia ficus-indica* exhiben una EUL de 10-20 kg de MS sobre el suelo ha⁻¹ año⁻¹ mm⁻¹ en áreas áridas con precipitaciones anuales de 200-400 mm.

REDUCCION DE LA EROSIÓN DEL SUELO

La degradación de la tierra ocurre en todos los continentes y afecta el sustento de millones de personas, incluyendo una gran proporción de pobres en las tierras secas (Nefzaoui *et al.*, 2014). Las zonas secas con un déficit de humedad anual de > 50% cubren aproximadamente el 40% de la superficie terrestre del planeta. Más del 70% de todas las áreas secas sufren de desertificación, y actualmente representan 36 millones de km² (Winckler, 2002). Agua y suelo son los recursos naturales renovables más preciados. Las estrategias para evitar y enfrentar la sequía son imperativas: por ejemplo, elegir cultivos tolerantes a la sequía, mantener bajas densidades de plantas y aplicar la conservación y captación de agua. Sin embargo, solo una pequeña fracción de lluvia se convierte en humedad del suelo utilizable: 1-10% de la lluvia que cae en las tierras áridas termina en el tejido de vegetación natural y cultivos de importancia económica (El Beltagy, 1999). La erosión hídrica se acelera por la labranza en pendientes y márgenes de barrancos. La productividad del suelo está disminuyendo rápidamente.

Suelos de zonas áridas y semiáridas son muy susceptibles a la erosión hídrica (Cornelis, 2006), principalmente debido a la escasa cobertura vegetal, el bajo contenido de materia orgánica y la escasa resistencia a las fuerzas de erosión. La magnitud de la erosión hídrica también depende de la textura, contenido de agua, evaporación, percolación y lixiviación. Estas características del suelo no son favorables a la resistencia del suelo a la erosión hídrica (D'Odorico y Porporato, 2006). En áreas áridas y semiáridas, los suelos con poca o ninguna cobertura vegetal están expuestos a eventos de precipitación torrencial, caracterizados por corta duración y



TABLA 1 Productividad (unidades de forraje por hectárea) de pastizales naturales y mejorados en Túnez (Nefzaoui y El Mourid, 2009)

Tipo de pastizal	Productividad (unidad de forraje por hectárea) ^a
Praderas naturales en Dhahar Tataouine, Túnez (100 mm de lluvia)	35-100
Pastizales privados mejorados por cultivo de nopal en Ouled Farhane, Túnez (250 mm de lluvia)	00-1 000
Los pastizales cooperativos mejorados a través de <i>Acacia cyanophylla</i> , Guettis, Túnez (200 mm de lluvia)	400-500

^a Una unidad de forraje equivale a 1 kg de energía metabolizable de grano de cebada.

alta intensidad, y son propensos a procesos físicos y químicos que cambian las condiciones de la capa superficial, como el sellado superficial y encostramiento. Cuando la superficie está seca, se forma una capa dura (costra). Los suelos encostrados son típicos de las áreas secas, donde la degradación del suelo es inducida por la disminución de las tasas de infiltración y el incremento de las tasas de escorrentía y erosión (Ries y Hirt, 2008). Las áreas áridas y semiáridas son ambientes frágiles donde la cubierta vegetal es escasa y los procesos de erosión del suelo ocurren rápida y severamente después de los eventos de lluvia. Sin embargo, incluso bajo tales condiciones, la vegetación nativa tiene un papel muy importante en la regulación de los procesos hidrológicos de superficie (Vásquez Méndez *et al.*, 2011).

El control de la erosión es otro uso importante de la tuna (*Opuntia* spp.), como crece rápidamente y tiene raíces pequeñas que vuelven a crecer cada año desde la raíz principal durante los tiempos de lluvia. En periodos secos, las raíces pequeñas mueren, agregando materia orgánica al suelo. Con un mayor contenido de materia orgánica, es más fácil para el suelo absorber el agua de lluvia. Los nopales (*Opuntia* spp.) son utilizados en programas para prevenir la erosión del suelo y combatir la desertificación; son muy adaptables, crecen en suelos severamente degradados que son inadecuados para otros cultivos, y son ideales para responder a los aumentos en los niveles atmosféricos de dióxido de carbono (CO₂). *Opuntia* también es importante como cobertura en áreas áridas y semiáridas, porque puede sobrevivir y diseminarse en condiciones de lluvia escasa y errática y altas temperaturas (Reynolds y Arias, 2001).

Las pruebas que involucran la plantación de nopales para las franjas de recolección de lluvia, surcos de contornos, estructuras de control de cárcavas y el control biológico de arroyos y pequeñas cárcavas han tenido buenos resultados. Los surcos de contorno consisten en bordes de piedra paralelos construidas a 5-10 m de distancia para evitar que el agua de escorrentía (y el suelo que transporta) dañe las áreas río abajo. Cada surco recoge la escorrentía del área inmediatamente río arriba/cuesta arriba, que se canaliza a una pequeña plantación de arbustos forrajeros o nopal. Con una combinación bien diseñada de surcos y nopal, los agricultores pueden completar con una gran proporción de sus necesidades de forraje. En el norte de África, particularmente en Túnez, el nopal es asociado exitosamente a las estructuras de recolección de agua. Plantados de acuerdo a las curvas de nivel, los setos de nopal juegan un papel importante en el control



de la erosión (**Figura 1**). Las propiedades físicas del suelo y el contenido de materia orgánica mejoran considerablemente bajo estos setos y en las áreas adyacentes inmediatas, con una mejora en materia orgánica y nitrógeno en comparación con los campos no tratados. Ha habido informes de tasas de incremento del 40-200% en materia orgánica y nitrógeno. Se mejora la estabilidad estructural de la capa superficial del suelo, se reduce la sensibilidad a la formación de costras superficiales, la escorrentía y la erosión, y aumenta la permeabilidad y la capacidad de almacenamiento de agua. Las tierras marginales se han rehabilitado a bajo costo en Túnez y Argelia mediante la plantación de contornos de nopal (Nefzaoui *et al.*, 2011).

En una comparación de diferentes sistemas de cultivo, tales como siembra cuesta abajo, siembra en contorno, reducción de deshierbe y cultivos asociados con setos de contorno, se encontró que las pérdidas de suelo (0.13-0.26 toneladas ha⁻¹ año⁻¹) son más bajas con cobertura de contorno. La plantación de nopal en los setos de contorno puede ayudar a retener ≤ 100 toneladas de suelo ha⁻¹ año⁻¹. Experimentos hechos en Brasil y Túnez muestran claramente que plantar cactus en un sistema agroforestal es más eficiente para la conservación del suelo y el agua que el uso convencional de la tierra (**Tabla 2**) (Margolis *et al.*, 1985).

La generación de tormentas de polvo masivas en el Sahara puede mover 66-220 millones de toneladas de sedimentos finos cada año. La erosión eólica es una de las principales causas de la degradación del suelo en tierras agrícolas en zonas áridas y semiáridas de todo el mundo. El viento daña el suelo al eliminar los componentes del sue-

Figura 1
Manejo en Túnez para la protección de la cuenca hidrográfica

TABLE 2 Comparación de la pérdida de suelo (toneladas ha⁻¹ año⁻¹) bajo diferentes cultivos en el noreste semiárido de Brasil (Margolis et al., 1985)

Tipo de cultivo	Fase de preparación del suelo	Fase de cultivo	Cosecha hasta la próxima temporada de crecimiento	Pérdidas totales de suelo	Factor C
Suelo desnudo	7.19	8.2	13.71	29.1	1
Algodón	2.42	1.77	6.72	10.91	0.392
Maíz	1.51	0.68	3.75	5.94	0.199
Maíz y frijoles	1.36	0.55	2.02	3.93	0.119
<i>Opuntia ficus-indica</i>	0.48	0.02	1.48	1.98	0.072
Pasto perenne	0	0.02	0.01	0.03	0.001



lo más ligeros, más fértiles y menos densos, como la materia orgánica, la arcilla y el limo. La reducción de la productividad del suelo no es el único impacto agrícola de la erosión eólica. Los sedimentos en el aire cortan y desgastan las plantas, reducen la supervivencia y el crecimiento de las plántulas, reducen el rendimiento de los cultivos y pueden aumentar la susceptibilidad a las enfermedades y la propagación de patógenos de las plantas (Northcutt, 2001). En tierras áridas sujetas a la erosión eólica, los nopales plantados solo como una barrera biológica o junto con barreras físicas son una manera fácil, barata y eficiente de prevenir y controlar la pérdida de la capa superficial del suelo, y facilitan la acumulación de depósitos transportados por el viento.

Los resultados algo dispersos obtenidos hasta la fecha son testimonio de la falta de investigación en este dominio. Las acciones de desarrollo se basan principalmente en suposiciones y observaciones recopiladas por los profesionales (Nefzaoui y El Mourid, 2010).

Muchas especies de Cactaceas viven en ambientes áridos y son extremadamente tolerantes a la sequía. Una técnica de supervivencia de *O. microdasys* (Lehm.) Pfeiff., que se origina en el Desierto de Chihuahua, radica en su único y eficiente sistema de recolección de niebla, atribuido a la integración de sus estructuras superficiales de múltiples niveles (Ju et al., 2012; Bai et al., 2015). Este sistema comprende grupos bien distribuidos de espinas cónicas y tricomas en el tallo del cactus; cada espina dorsal contiene tres partes integradas, cada una con un papel diferente en la recolección de niebla, dependiendo de las características estructurales de su superficie. El gradiente de presión de Laplace, el gradiente de energía libre de superficie y la integración multifunción proporcionan una recolección de niebla eficiente. También hay evidencia de que algunas especies de cactus pueden cosechar rocío en sus tallos y espinas (Malik et al., 2015)

Opuntia puede tolerar la sequía en espacios abiertos aumentando y moviendo cloroplastos y evitando dismi-

nuciones drásticas en su potencial osmótico (Delgado Sánchez et al., 2013). *O. ellisiana* Griffiths es una planta CAM, y su eficiencia de conversión de agua a materia seca es varias veces mayor que la de plantas C3 o C4. Una cantidad significativa de agua (17 mm = 170 000 kg ha⁻¹) puede ser almacenada en este cactus y usada para dar de beber a los animales (Han y Felker, 1997). El nopal puede aprovechar la lluvia más ligera, porque sus raíces están cerca de la superficie del suelo. El agua es recolectada rápidamente por las raíces y almacenada en sus tallos gruesos y expandibles. Los tallos carnosos del cactus barril (*Ferocactus wislizeni* Britton & Rose) se pliegan como un acordeón y se encogen a medida que se agota la humedad. Los tallos verdes producen la comida de la planta, pero pierden menos agua que las hojas, gracias a sus poros hundidos y una capa cerosa en la superficie del tallo. Los poros se cierran durante el día y se abren por la noche y, por lo tanto, solo liberan una pequeña cantidad de humedad. El precio que pagan los cactus por estas adaptaciones que ahorran agua es un crecimiento lento (Zemon, 2015).

Hay una necesidad urgente de mejorar las actividades de investigación en curso con una iniciativa de investigación sólida para indagar todos los posibles beneficios y la eficiencia de las nuevas tecnologías utilizando cactus como especies clave para ayudar a controlar la desertificación y adaptarse al calentamiento global (Nefzaoui y El Mourid, 2010).

CERCAS BIOLÓGICAS/BARRERAS VEGETATIVAS

La tuna se puede cultivar como setos y vallas al plantarlas entre ellas a unos 30 cm de distancia. Luego de varios años, las plantas crecen juntas para formar una pared de cladodios o ramas espinosas que sobresalen en todos los ángulos. Las plantaciones también pueden establecerse para el control de la erosión en

áreas deforestadas. Con el tiempo, los cactus como *O. ficus-indica* pueden convertirse en plantas de ramificación libre de 3-6 m de altura (Extensión Cooperativa de la Universidad de California, 1989). El uso de varias especies de nopal para cercar tiene grandes beneficios, que van mucho más allá de los ahorros que se obtienen al no tener que usar recursos costosos como el hierro. Una vez creada, una cerca viviente proporciona fruta y una excelente seguridad para cultivos y hogares, a la vez que proporciona un hogar o hábitat para especies de fauna silvestre. Los ciervos y sus principales depredadores pueden saltar sobre él o pasar a través de túneles naturales. Además, si se le dan cantidades razonables de agua, los nopales pueden crecer rápidamente y, dado que la mayoría de las granjas y hogares tienen agua, se puede establecer una cerca en tan solo 1 año. Entre más cercanas se plantan los cladodios, más rápido se rellena la cerca y más tarde se hace necesario un trabajo de poda difícil. Una vez establecido, una cerca de nopal proporciona seguridad, hermosas flores (las abejas y otros insectos son atraídos por ellas) y frutas. Cada variedad debe ser evaluada para facilitar el manejo y el sabor, ya que algunos tienen demasiadas semillas. Una variedad espinosa de tuna estándar *Opuntia* hace una buena cerca; y las variedades sin espinas no mantendrán alejados a los humanos, ya que la falta de espinas se puede ver desde la distancia. El azulado *O. violacea* Engelm var. *santa-rita* (Griffiths & Hare) L. D. Benson hace una cerca excelente - la fruta es de fibras rojizas, llena de semillas y casi no tiene pulpa comestible- también tiene espinas gruesas agrupadas. Para hacer una cerca, corte los cladodios más gruesos de una planta, deje cicatrizar el corte durante aproximadamente una semana y luego siembre los cladodios con una distancia de 1.3 m. Sin embargo, si hay poco tiempo disponible, coloque los cladodios en el suelo el mismo día y déjelos durante un año o dos; crearan una planta en forma de copa que y retienen el agua de lluvia. Si se adopta este último método, los cladodios muy gruesos o leñosos son las mejores (White Dove Farm, 2015).

Los nopales espinosos *O. ficus-indica* var. *amyclaea* (Ten.) A. Berger y var. *elongata* Shelle se usan a menudo como cercos defensivos para la protección de jardines, huertos y olivares en todo el norte de África y en partes de Italia y España. Estos cercos demarcan los límites y ayudan a controlar la erosión. Sin embargo, en regiones donde los inviernos son de templados a leves (temperatura mínima diaria media en enero > 3° C), los frutos de los setos de *Opuntia* pueden hospedar la mosca de la fruta, *Ceratitis capitata* L. Los nopales para producción de frutos pueden, por lo tanto, necesitar tratamiento contra la mosca de la fruta o ser eliminados de otras áreas de cultivo de frutas. Sin embargo, en el caso de los nopales forrajeros, si se cosechan cada 2-3 años, no producen fruto y, por lo tanto, no llegan a albergar moscas de la fruta. Estos cercos vivos

no solo desempeñan un papel defensivo muy eficaz (especialmente cuando se establecen en filas dobles), sino que también desempeñan un papel importante en la organización del paisaje y la socioeconomía local, definiendo los derechos territoriales y la propiedad de la tierra en países o regiones donde no existe registro de tierras. Los cercos de nopal a menudo se plantan como testimonio de la propiedad de la tierra, porque en algunos países, la tradición dictamina que la tierra tribal puede convertirse en propiedad de cualquiera entre los usuarios legítimos que haya establecido un cultivo permanente en ella. Esta es una fuerte motivación para plantar setos de nopal (y olivares) en tierras comunales, y explica su popularidad en países como Túnez.

Los cercos de nopal también juegan un papel importante en el control de la erosión y la división de la pendiente de la tierra, particularmente cuando se establecen a lo largo de los contornos. Las propiedades físicas del suelo y el contenido de materia orgánica se mejoran considerablemente bajo los cercos y en las áreas inmediatamente adyacentes (Monjauze y Le Houérou, 1965b). Los agregados en la capa superior del suelo se vuelven más estables y menos sensibles a las costras superficiales, la escorrentía y la erosión; la permeabilidad y la capacidad de almacenamiento de agua aumentan. Además, los setos son un obstáculo físico para la escorrentía: ayudan a acumular la escorrentía local temporal y la sedimentación y evitan la erosión regresiva. Algunas tierras baldías, desarrolladas en afloramientos de lutitas y laderas pedregosas/rocosas, se han rehabilitado a bajo costo en Túnez y Argelia con la siembra de cercos de nopal. En tierras áridas sujetas a la erosión eólica, los cercos de nopal son una manera fácil, económica y eficiente de prevenir y controlar la pérdida de la capa superficial del suelo y la acumulación de depósitos transportados por el viento (Le Houérou, 1996a).

El costo de establecer una cerca depende del material utilizado. Una valla metálica (de cuatro hilos de alambre de púas) cuesta alrededor de US\$1 m⁻¹, es decir, US\$150 ha⁻¹ en Túnez para plantaciones de unas 10 ha. Una valla hecha con una doble hilera de nopales espinosos cuesta menos de US\$60 ha⁻¹, pero debe establecerse durante al menos 2 años antes de que comience a funcionar (Le Houérou, 1989).

POTENCIAL DE SECUESTRO DE CARBONO

En las últimas cuatro décadas, se ha hecho evidente que el aumento del CO₂ atmosférico derivado del consumo de combustibles fósiles está causando una mayor variabilidad climática. Esto lleva a problemas importantes asociados con el calentamiento global y modificaciones de los patrones de precipitación continental que ya es-



tán teniendo efectos significativos sobre la distribución de las especies y la función en las plantas (Walther *et al.*, 2002; Root *et al.*, 2003). La investigación se ha centrado en evaluar el potencial del secuestro biológico de CO₂ para varios tipos de plantas. En comparación con las plantas C₃ y C₄, las plantas CAM (agaves y nopales) pueden usar el agua de manera mucho más eficiente con respecto a la absorción de CO₂ y la productividad (Nobel, 2009). La generación de biomasa por unidad de agua es en promedio 5-10 veces mayor que en las plantas C₄ y C₃ (Tabla 3). El potencial de los sistemas CAM para acumular alta biomasa depende de su capacidad para reparar más carbohidratos al crecimiento que al metabolismo ácido nocturno (Borland y Dodd, 2002).

El papel de las plantaciones de nopal en el ciclo del carbono es extremadamente importante. Ayudan a completar el ciclo de la vida al reciclar los nutrientes del bloque de construcción a las plantas y el carbono (CO₂) a la atmósfera (Doran, 2002). Esto es importante en el proceso de descomposición del suelo y a menudo está mediado por organismos en el suelo. Varios experimentos en diferentes regiones se han llevado a cabo para cuantificar el potencial de secuestro de carbono de *Opuntia*. Las mediciones del intercambio de gases en *O. ficus-indica* comenzaron a principios de la década de 1980, cuando Nobel y Hartsock (1983) midieron la captación de CO₂ en cladodios simples, utilizando analizadores de gas infrarrojos portátiles con cubetas adaptadas para ajustarse a la morfología del cladodio.

A la temperatura óptima y a la radiación interceptada, los valores instantáneos de absorción neta de CO₂ de cladodios de 1 año pueden alcanzar 18 mmol m⁻² s⁻¹, con una absorción diaria total de CO₂ de 680 mmol m⁻² (Nobel y Bobich, 2002). En un estudio similar, - evaluando los efectos de las variaciones estacionales en la temperatura, la irradiación y el contenido de humedad del suelo en las tasas fotosintéticas de *O. ficus-indica* - la absorción neta diaria total de CO₂ fue de 393 mmol m⁻² promediada en cinco fechas de medición, y la absorción anual de CO₂ fue de 144 mol m⁻² (Pimienta Barrios *et al.*, 2000).

Opuntia tiene una mayor eficiencia en el uso del agua que las plantas C₄ o C₃ debido a la ruta fotosintética CAM, que es más eficiente en la conversión de agua y CO₂ en materia seca (Nobel, 1991, 1994, Han y Felker, 1997; Nobel, 2009). Según lo declarado por Nobel (2009), las consecuencias del intercambio de gases nocturnos dependen de la temperatura. Las temperaturas son más bajas por la noche, lo que reduce las concentraciones internas de vapor de agua en las plantas CAM y da como resultado una mejor eficiencia en el uso del agua. Esta es la razón clave por la cual las especies CAM son las plantas más adecuadas para los hábitats áridos y semiáridos. La importancia de la apertura nocturna y el cierre diurno de los estomas en

las especies CAM para la conservación del agua ha sido reconocida desde hace tiempo (Black y Osmond, 2003). Además de las ventajas de ser una especie CAM, las plantas *Opuntia* también son conocidas por su capacidad de regenerarse y crecer fácilmente.

Actúan como sumideros de carbono y se pueden cultivar a gran escala en áreas donde la precipitación es inadecuada o poco confiable. Pueden crecer donde la evaporación es tan grande que la lluvia no es efectiva para el crecimiento del cultivo (Osmond *et al.*, 2008). Las plantas C₃ y C₄ sufren daños irreparables una vez que pierden el 30% de su contenido de agua, mientras que muchos cactus pueden sobrevivir a una pérdida del 80-90% de su contenido de agua y aun así sobrevivir. Esto se debe a la capacidad de las plantas CAM de almacenar grandes cantidades de agua; para cambiar el agua entre las células y mantener el metabolismo crucial activo; y para tolerar la deshidratación celular extrema (Nobel, 2009). Estas habilidades, a su vez, se derivan de las características del cactus: cutículas muy gruesas que proporcionan una barrera eficiente para la pérdida de agua; presencia de mucílago; y cierre estomático diurno. Además, los nopales se caracterizan por el desarrollo asincrónico de diversos órganos de plantas, de modo que incluso en las peores condiciones, una parte de la planta no se ve afectada. Es bien sabido que los nopales crecen en el desierto donde las temperaturas son extremadamente altas. Diversos autores (por ejemplo, Nobel, 2009) informan que muchos agaves y nopales pueden tolerar altas temperaturas de 60-70°C.

Este aspecto fue abordado en detalle por Nobel (2009). En vista de las adaptaciones fenológicas, fisiológicas y estructurales específicas de los nopales descritas anteriormente, se los puede considerar bien posicionados para hacer frente al futuro cambio climático global. *Opuntia ficus-indica*, por ejemplo, puede generar un secuestro de carbono de 20 toneladas de materia seca (equivalente a 30 toneladas de CO₂) por hectárea y por año en condiciones de crecimiento no óptimas similares a las de las regiones áridas del norte de África.

Se sabe que una especie de *Opuntia* ocupa tierras abiertas y abandonadas e invade matorrales y bosques abiertos. Esto ocurre especialmente en los hábitats impredecibles, pero frecuentemente húmedos del centro este de Australia que tienen precipitaciones no efectivas para el crecimiento de los cultivos agrícolas (Leeper, 1960, Osmond *et al.*, 1979). La planta ha tenido éxito en su hábitat adoptado por múltiples razones: en parte, porque es una planta CAM con un potencial de conservación de agua excepcional; en parte, debido a su extraordinariamente baja relación raíz-a-brote, dominada por la biomasa de cladodios sobre el suelo, que puede enfocarse en la actividad fotosintética; pero sobre todo, porque se caracteriza por actividades extraordinarias de reproducción vegetativa y sexual.



El aumento del CO₂ atmosférico estimula un mayor crecimiento y la captura de carbono de *O. ficus-indica* (Gomez Casanovas *et al.*, 2007). Drennan y Nobel (2000) informaron que la duplicación del CO₂ atmosférico estimuló la absorción total de CO₂ en un promedio de 31% para seis cactus grandes y estimuló el crecimiento y la biomasa en un 33%. Estas respuestas fueron sorprendentes porque no se esperaba que el CO₂ elevado estimulara la asimilación de CO₂ en presencia de estomas cerrados en la luz; además, se esperaba que la asimilación de CO₂ en la oscuridad por la fosfoenolpiruvato carboxilasa se saturara con CO₂ interno. Sin embargo, estas respuestas concuerdan con lo que ahora se sabe de las limitaciones de difusión de la fijación de CO₂ en todos los estados de crecimiento de especies de CAM (Rascher *et al.*, 2001; Nelson *et al.*, 2005; Griffiths *et al.*, 2007). Wang y Nobel (1996) encontraron que el crecimiento de *O. ficus-indica* en CO₂ elevado durante 3 meses mostró poca evidencia de regulación a la baja de la fotosíntesis que se encuentra comúnmente en las plantas herbáceas. Las plantas herbáceas generalmente experimentan limitaciones de sumideros y efectos de retroalimentación del azúcar sobre la asimilación de CO₂ y la expresión génica. Sin embargo, en *O. ficus-indica*, se encontró una mayor asimilación de CO₂ (capacidad de fuente) con un mayor transporte de sacarosa en el floema y una mayor resistencia al hundimiento. Drennan y Nobel (2000) concluyeron que las comunidades CAM de biomasa alta ofrecen potencial como un sistema de bajo insumo para el secuestro atmosférico de CO₂ en hábitats áridos. Aunque se necesita más investigación, las plantas CAM de larga vida en ecosistemas áridos pueden presentar sistemas regionales efectivos de captura de carbono en escalas de tiempo de décadas a siglos.

Se dispone de datos limitados sobre la absorción neta de CO₂ por cladodio, de acuerdo con la edad del mismo. Liguori *et al.* (2013a) utilizaron una cámara abierta de intercambio de gases para medir la captación total de CO₂ de la planta o de un solo órgano en nopales, particularmente para comprender la respuesta de toda la planta al estrés ambiental. A diferencia de las mediciones de cladodios individuales, después de 60 días de sequía la planta completa mantuvo el mismo nivel de absorción neta de CO₂, aunque hubo una pérdida sustancial de agua en el parénquima de los cladodios más fotosintéticamente activos. Se requieren investigaciones futuras sobre la captación individual de CO₂ del cladodio para comprender cuáles son las mejores prácticas de poda necesarias para aumentar la absorción de CO₂, en particular para los campos cultivados de *O. ficus-indica*.

CULTIVO EN CALLEJONES

La expansión de los cultivos de cereales en los pastizales, combinado con el hecho de no permitir que las tierras permanezcan en barbecho, es una de las principales razones de la disminución de la fertilidad del suelo y la erosión eólica. Una forma de combatir la degradación resultante del monocultivo de cereales es la introducción de leguminosas forrajeras adaptadas, arbustos/árboles forrajeros y cactus en el sistema de cultivo (Nefzaoui *et al.*, 2011). El cultivo en callejón es una práctica agroforestal donde los cultivos perennes se cultivan simultáneamente con un cultivo herbáceo. Arbustos, árboles o nopales se cultivan en filas anchas y cultivo se coloca en el espacio intermedio. El cultivo en callejones es una forma de cultivos en hilera intercalados. Se prefieren las leguminosas y especies arbóreas/arbustivas de crecimiento rápido debido a sus atributos de mejora del suelo, es decir, su capacidad de reciclar nutrientes, suprimir las malezas y controlar la erosión en terrenos en pendiente. Esta tecnología permite al agricultor continuar cultivando la tierra, mientras que los árboles/arbustos plantados en hileras intermitentes ayudan a mantener la calidad del suelo. Los nopales pueden funcionar en este sistema como cortavientos, lo que resulta en rendimientos mejorados de hierba/cereal.

Los anchos callejones permiten a los animales pastar estratos de biomasa o rastrojos de cereales durante el verano; los cladodios de los nopales se pueden cosechar, picar y entregar directamente a los animales en pastoreo como un suplemento energético a los rastrojos de baja calidad (Nefzaoui *et al.*, 2011).

Aunque los nopales son bien conocidos como las mejores plantas para la reforestación de áreas áridas y semiáridas debido a su resistencia a las lluvias escasas y erráticas y a las altas temperaturas, los sistemas de cultivo en callejón en Túnez son un fenómeno en gran parte nuevo. Cuando se maneja adecuadamente, el cultivo en callejones puede generar ingresos a diferentes intervalos de tiempo para diferentes mercados de manera sostenible y orientada a la conservación. Los diseños de callejones también pueden optimizar el espacio disponible entre los árboles, agregando protección y diversidad a los campos agrícolas.

La práctica de plantar solo arbustos no se adopta ampliamente por varias razones, incluido el diseño técnico de la plantación, la mala gestión y la competencia por la tierra a menudo dedicada a los cultivos de cereales. Algunas de estas desventajas pueden superarse mediante el **cultivo en callejones**, que:

- mejora el suelo;
- aumenta el rendimiento de la cosecha;
- reduce malezas; y
- mejora el rendimiento animal.





Figura 2
Cultivo de callejones
usando *Opuntia
ficus-indica* y cultivo de
cebada

El cultivo en callejones administrado adecuadamente permite la diversificación y el agricultor puede beneficiarse de varios mercados. También promueve la sustentabilidad tanto en la producción agrícola como ganadera. En Túnez se evaluaron los beneficios del cultivo de callejones de nopal y cebada (Alary *et al.*, 2007; Shideed *et al.*, 2007). En comparación con la cebada sola, la biomasa total (paja más grano) de cebada cultivada entre hileras de nopal sin espinas aumentó de 4.24 a 6.65 toneladas ha^{-1} , mientras que el rendimiento aumentó de 0.82 a 2.32 toneladas ha^{-1} (Tabla 3, Figura 2) Estas cifras son el resultado del microambiente creado por el cultivo en callejones con nopal, que crea un "cortaviento" beneficioso, lo que reduce la pérdida de agua y aumenta la humedad del suelo. La cosecha de cebada estimuló un aumento en el número de cladodios y tunas, mientras que el nopal aumentó la cantidad de raíz lo que contribuye a la materia orgánica del suelo.

CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD

La intensificación de las prácticas agrícolas en un contexto de cambio climático es motivo de preocupación, ya que altera dramáticamente las características del suelo y afecta a las comunidades locales de flora y fauna (Ouled Belgacem y Louhachi, 2013). Estas perturbaciones afectan a la biodiversidad, el factor más importante que afecta a la estabilidad de los ecosistemas y agroecosistemas (Fontaine *et al.*, 2011). Detener o revertir el declive de la biodiversidad es un desafío importante para el mantenimiento de la biodiversidad y de servicios ecosistémicos más amplios.

Las tunas son prominentes en muchos hábitats áridos y semiáridos. Tienen un papel importante en la ecología y son importantes para la fauna y la flora que comparten su hábitat. Padilla y Pugnaire (2006) informan que algunas plantas se benefician de vecinos con los que están estrechamente asociados, un fenómeno conocido como facilitación. Los cactus a menudo actúan como "plantas nodrizas" en los climas cálidos: su sombra, y algunas veces los nutrientes asociados con su presencia, ayudan a establecer las plántulas de otras especies, que de otro modo no serían capaces de establecerse en suelos cálidos o pobres. Los nopales pueden ser una fuente atractiva de refugio para la vida silvestre y su sombra es muy importante para los animales, así como para otras especies de plantas. Las especies de nopal proporcionan sitios de anidación importantes para aves, roedores y otros animales. Las aves se posan en sus ramas para examinar su entorno. Los excrementos de pájaros a menudo contienen semillas de otras plantas y la sombra de los nopales puede proporcionar un microclima que favorece que puedan vivir ahí otras plantas.

TABLA 3 Cambios totales de biomasa y rendimiento de la cosecha de cebada (toneladas ha^{-1}) en Sidi Bouzid (Túnez)^a (Alary *et al.*, 2007)

Tratamiento	Pastizal natural	Cultivo de cebada solo	Cultivo de nopal solo	Cultivo en callejón (nopal + cebada)
Biomasa por encima del suelo (toneladas ha^{-1})	0.51	0.53	1.87	7.11
Biomasa subterránea (toneladas ha^{-1})	0.33	0.11	1.8	1.98
Rendimiento de grano de cebada (toneladas ha^{-1})	1.51	0.82		2.32
Cebada grano + paja + malezas (toneladas ha^{-1})	1.36	4.24		6.65

^a La precipitación media en Sidi Bouzid es de 250 mm $año^{-1}$. Todos los tratamientos se hicieron sin fertilizantes.

Los nopales proporcionan frutas y flores para una variedad de animales: muchas especies de aves, murciélagos e insectos, incluidas las abejas. Los nopales sobreviven en el entorno natural sin riego artificial y producen la mayoría de sus flores y frutos durante la estación seca, cuando hay muy pocos recursos disponibles para la vida silvestre; además, sus flores atraen a las mariposas y otros insectos polinizadores. Algunas especies de *Opuntia* producen fruta jugosa en verano, apreciada por muchas aves. Las frutas suculentas que contienen muchas semillas son particularmente atractivas para las aves paseriformes; por esta razón, no es raro encontrar plantas que se desarrollan hasta la madurez en afloramientos rocosos, en postes de valla de madera o a lo largo de líneas de cerca de alambre. Los nopales tuneros ofrecen una protección a las aves. Por ejemplo, la matraca del desierto (*Campylorhynchus brunneicapillus* Lafresnaye) es nativa en el suroeste de los Estados Unidos de América y hacia el sur hasta el centro de México. Se encuentra en los desiertos y las estribaciones áridas caracterizadas por nopal, mezquite, yuca y otros tipos de matorrales del desierto. Anida en las plantas de nopal, a veces en un agujero en un saguaro o donde está protegido por las hojas espinosas de una cholla o yuca. Construir el nido en el nopal proporciona cierta protección para los jóvenes, pero las matracas también usan estos nidos durante todo el año para dormir. Comen principalmente insectos, ocasionalmente semillas o frutas, pero raramente beben agua, obteniendo humedad de sus alimentos.

Cientos de especies de hormigas usan cactáceas para alimentarse y - junto con otros insectos - son importantes polinizadores de nopales. Mientras que otros depredadores encuentran las espinas intimidantes, las hormigas se alimentan a lo largo de tallos de cactus, capturando fauna pequeña y alimentándose de nectarios extraflorales, que proporcionan una mezcla de azúcar a menudo alta en contenido de aminoácidos. Además, las hormigas y otros insectos se alimentan de semillas de nopal y juegan un papel en la dispersión de semillas. Los nopales proporcionan un hábitat para muchos tipos de insectos diferentes. El asesino de abejas, *Apiomerus crassipes* Fabricius, acecha en las flores de nopal y ataca a las abejas o las hormigas al inyectar una enzima paralizante con su pico hipodérmico. El insecto cochinilla, *Dactylopius coccus* Costa, es una especie críptica (un taxón que usa la anatomía o el comportamiento para eludir a los depredadores) y las hembras pasan toda su vida en colonias en los tallos del nopal. Esta especie de insecto se caracteriza por la secreción de ácido carmínico, utilizado por los antiguos aztecas para producir un tinte carmesí. Cientos de especies de mariposas, polillas y hémípteros son polinizadores conocidos de Cactaceae (Hogan, 2015). Las flores con-

tienen grandes cantidades de néctar y los frutos son ricos en agua.

Los nopales también son importantes para muchos animales del desierto. Murciélagos nectarívoros, *Lep-tonycteris curasoae* Mill. y *Glossophaga longirostris elongata* Petit y Pors, son valiosos para la polinización de muchas plantas importantes en Curazao, y dependen de los cactus columnares para su supervivencia. Su dieta consiste principalmente en néctar de cactus, polen y frutas cuando están disponibles. Los mamíferos más grandes, como el ciervo de cola blanca (*Odocoileus virginianus* Zimmerman), en realidad consumen los cladodios de nopal, a pesar de la formidable armadura espinosa (Ramawat, 2010). Los cladodios del nopal se llenan con agua, utilizada por varios animales, incluyendo al perico cara sucia (perico de garganta marrón *Aratinga pertinax* L.) y el venado de cola blanca. Los coyotes (*Canis latrans* Say) se alimentan en un hábitat matorral semidesértico y consumen una variedad de alimentos durante todo el año. Muchas especies de cactus en el desierto de Sonora producen frutos durante el verano, una fuente importante de alimento en los meses más secos. Los coyotes se alimentan de frutos de cactus cuando están maduros, como lo demuestra el análisis de los excrementos recolectados en otoño (Short, 1979). En Arizona, las ratas monteras, también conocidos como la rata estadounidense, viven principalmente en el desierto debajo de cactus caídos y pilas de escombros. Se entierran bajo un cactus (usualmente nopal), matando las raíces y causando que el cactus colapse sobre ellas. Esto crea una casa con armadura espinosa relativamente segura de los depredadores de mamíferos y aves. Algunas especies usan la base de un nopal como el sitio de su hogar, utilizando las espinas del cactus para protegerse de los depredadores.

Desafortunadamente, el hábitat proporcionado por los cactus no siempre es beneficioso o agradable para los humanos. Como resultado, durante los meses de verano muchos rancheros queman nopal para eliminarlos de sus campos. Mientras que los nopales a menudo se consideran malezas invasoras en gran parte del sur de los Estados Unidos de América, la presencia de muchas especies de *Opuntia* fue documentada por los primeros pobladores de la zona. También en México, la planta se considera a menudo como una mala hierba, pero es una fuente importante de alimentos en la cultura mexicana. Los cladodios de nopal se han convertido recientemente en una tendencia de salud y se venden como hortalizas en muchos supermercados de los Estados Unidos de América. Se espera que su uso como alimento destaque la importancia de la planta; sin embargo, muchos aún no se han dado cuenta de su importancia ecológica para la biodiversidad.



CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Las sociedades humanas obtienen muchos bienes y servicios esenciales de los ecosistemas naturales. Este capítulo se centra en la importancia del nopal y su importante papel en el sustento de los agricultores. Los bienes y servicios proporcionados por los nopales incluyen: control de la erosión del suelo y el agua; regulación del clima a través del secuestro de carbono; conservación de la biodiversidad; hábitat para la vida silvestre; beneficios farmacéuticos e industriales - además de su belleza estética como plantas de hoja perenne. A pesar de su importancia ecológica, económica y social, los cactus reciben atención científica y mediática limitada y no hay suficiente atención sobre sus méritos de conservación. Esto se debe en gran parte al conocimiento limitado y a una visión estrecha centrada

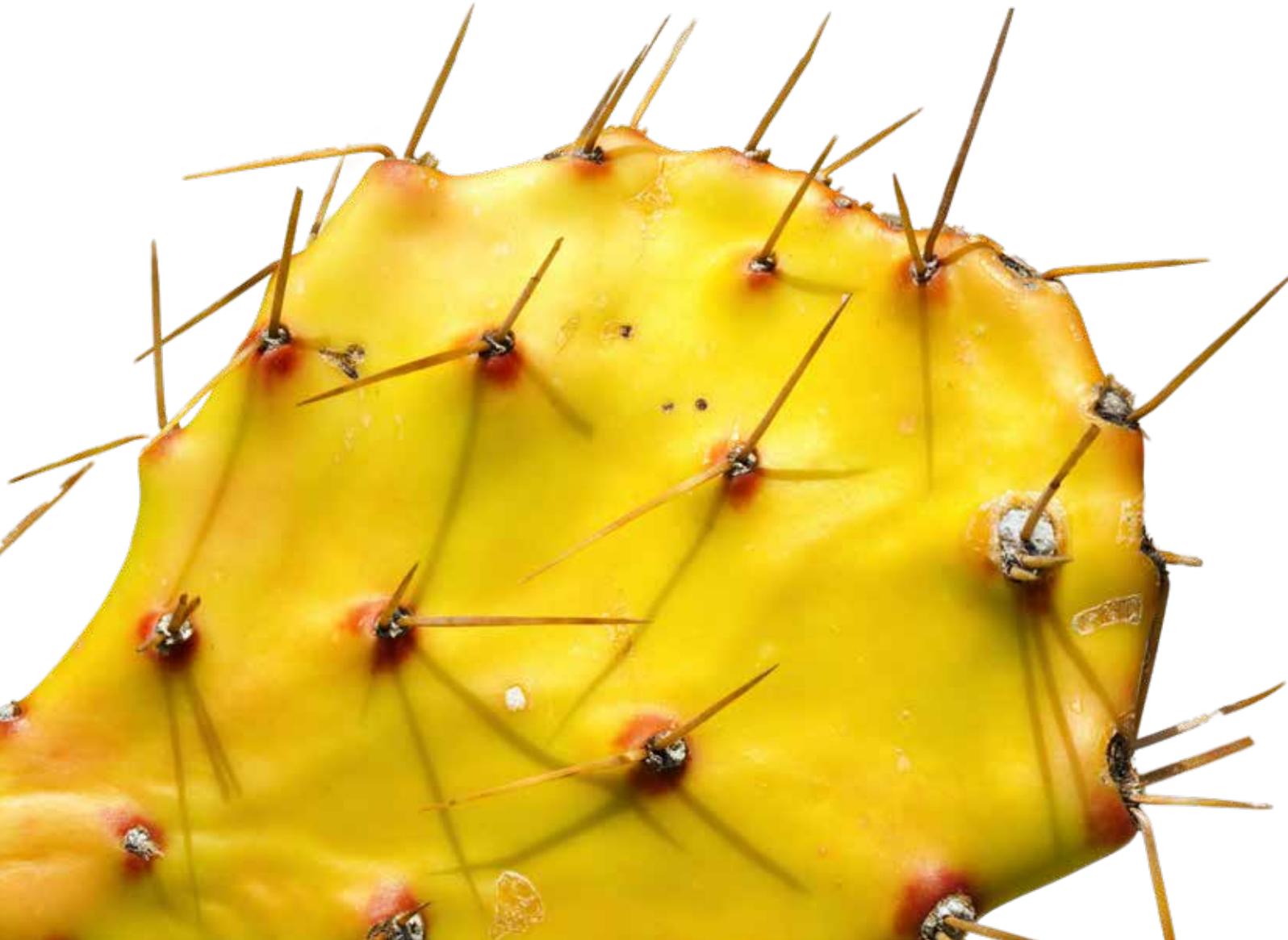
en las cactáceas para la producción de forraje y fruta. Se requiere un cambio importante en el papel de los nopales y su producción, hacia un concepto mucho más amplio de bienes y servicios de los ecosistemas. Se necesita un **enfoque holístico**, con un equilibrio entre la conservación del medio ambiente, la producción de sistemas agrícolas y el desarrollo socioeconómico. Sería de gran beneficio promover los beneficios ecológicos, económicos y sociales de las cactáceas y fortalecer la capacidad técnica de los recursos humanos dedicados a estas especies. Además del análisis de las tendencias actuales en investigación, es vital presentar nuevos descubrimientos y planes para futuras investigaciones en todas las áreas relacionadas con las cactáceas. Las políticas públicas y el crédito son esenciales para aumentar el cultivo de esta importante planta en las regiones áridas y semiáridas del mundo.



Invasiones globales del nopal (*Opuntia* sp.): control, manejo y conflictos de interés

Helmuth Zimmermann

Helmuth Zimmermann y Asociados, Pretoria, Sudáfrica



INTRODUCCIÓN

El valor del nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., es indiscutible (Barbera *et al.*, eds, 1995; Mondragón Jacobo y Pérez González, 2001; Nobel ed., 2002; Sáenz *et al.*, eds, 2006) y se han realizado esfuerzos considerables para introducir este cultivo emergente a varios países en desarrollo con algunos éxitos (De Waal *et al.*, 2015). El valor del nopal como un recurso forrajero no ha sido rebasado por su valor como cultivo frutal. Sin embargo, varios países incluyendo países en desarrollo en África Subsahariana han adoptado seriamente esta nueva planta de cultivo, por ejemplo Botswana, Namibia, Angola, Zimbabue, Mozambique, la República Unida de Tanzania y Zambia. El nopal permanece como un cultivo emergente subutilizado con muchos usos potenciales. Otros cactus cultivados recientemente comercializados y que están ganando popularidad son *Nopalea cochenilifera* (L.) S-D, *O. undulata* Griffiths (Brasil) (Cordeiro dos Santos y Gonzaga de Albuquerque, 2001). Desafortunadamente el valor comercial de las especies de nopal (incluyendo *O. ficus-indica* y *O. monacantha*) se han vuelto invasivas en varios países (Novoa *et al.*, 2016), resultando en intentos bien publicitados para su manejo y control (Kaufmann, 2001; Zimmermann y Moran, 1982).

Durante los últimos 50 años ha habido un incremento en el número de especies invasivas, particularmente dentro de la subfamilia Opuntioideae, pero varios nuevos invasores de las subfamilias Cactoideae y Pereskioideae también se han vuelto invasivas, dando un número total de especies reportadas como invasoras cercano a 57 (Novoa *et al.*, 2016). El número de especies invasivas en Sudáfrica se ha incrementado de 13 (todas *Opuntia*) en 1947 a 35 en 2014, incluyendo al menos ocho especies de Cactoideae. Algunas especies invasivas de *Opuntia* han requerido drásticas medidas de control (e. g. control químico usualmente seguido de control biológico) cuando los métodos de control convencional probaron ser eficientes (Petty, 1948; Annecke y Moran, 1978; Moran y Annecke, 1979; Zimmermann y Moran, 1982). La forma espinosa de *O. ficus-indica*, conocida como nopal tunero, y dos nuevos registros de *Opuntia* invasivas, llamadas *O. robusta* Pf y *O. engelmannii* S-D, son actualmente consideradas, principalmente como recurso forrajero, particularmente para reducir la infestación, pero en su mayor parte el beneficio es derivado del recurso extensivo no explotado (Felker, 1995). En el pasado ha habido conflictos de interés basados en percepciones verdaderas o falsas de que el nopal pueda ser invasivo

o benéfico, resultando en demoras para la implementación de programas de control biológico. En vista del incremento en la importancia de los cultivos comerciales de *Opuntia*, los permisos para liberar los agentes de control biológico no se han concedido hasta el día de hoy, con consecuencias directas para futuros proyectos de control biológico de nuevas especies emergentes en ambas subfamilias.

El capítulo provee una revisión histórica de los nopales invasores en tres subfamilias Opuntioideae, Cactoideae y Pereskioideae - de acuerdo con la taxonomía de Anderson (2001) y Hunt (2006) - y el control de estas invasoras se enfoca en nuevos enfoques para superar el creciente problema de conflictos de interés. Las densidades de nopales, a las cuales se convierte en maleza dentro de su distribución nativa en el continente Americano, no se incluyen en esta discusión.

NOPALES COMO PROBLEMA

A pesar de la limitada información disponible, se ha hecho un intento para identificar las especies de nopales mas invasivas, la extensión de la invasión, sus orígenes, uso y manejo (si hay alguno). Esta información se resume en las **Tablas 2 y 3**. Las percepciones de *Opuntia* cultivadas e invasivas, y como se relacionan al manejo de especies problemáticas y su aceptación como cultivo emergente de nopal tunero también se presentan. Se proponen soluciones para alcanzar opciones de manejo aceptables.

Dentro de la subfamilia Opuntioideae, el género *Cylindropuntia* y *Opuntia* contienen las más invasivas fuera de América; se han confinado principalmente a Australia y África Subsahariana (**Tabla 1**).

Dentro de Opuntioideae, el género *Opuntia* cuenta por mucho con las más invasoras; se detallan en la **Tabla 2**. Al menos 37 países han reportado actualmente *Opuntia* como invasiva, pero hay pequeñas invasiones nuevas en muchos países mas, e. g. numerosas islas y países en desarrollo en África. La **Tabla 3** enumera las especies de nopales invasivas en las subfamilias Cactoideae y Pereskioideae; comparado con Opuntioideae, son unas cuantas, pero la cantidad de reportes de especies invasivas no se había reportado tanto como se incrementó en la década anterior. Solamente ocho especies de Cactoideae fueron reportadas en 1984 (Moran y Zimmermann, 1984b), comparado con 18 en 2015. Pueden esperarse nuevas invasiones graves de este grupo.



TABLA 1 Cactus invasivos por género en las tres subfamilias y en países donde se han reportado invasiones serias

Género en Opuntioideae	Países donde es invasiva	No. total spp. en el género	No. spp. invasivas
<i>Austrocylindropuntia</i>	Australia, Kenia, Namibia, Sudáfrica, España, Italia, Francia	11	2
<i>Corynopuntia</i>	Australia	14	1
<i>Cylindropuntia</i>	Australia, Bostwana, Israel, Kenia, España, Zimbabue	33	8
<i>Opuntia</i>	Angola, Algeria, Australia, Austria, Islas Canarias, China, Croacia, República Checa, Eritrea, Etiopia, Francia, Alemania, Gana, India, Kenia, Madagascar, Mauritania, Marruecos, Namibia, Nueva Zelanda, Islas del Pacífico, Portugal, Isla Reunión, Arabia Saudita, Somalia, España, Sri Lanka, Sudáfrica, Suazilandia, suiza, República Unidad de Tanzania, Túnez, Uganda, Yemen y Zimbabue.	181	27
<i>Tephrocactus</i>	Australia, Sudáfrica	6	1
Géneros en Cactoideae	Países donde es invasiva	No. total spp. en el género	No. spp. invasivas
<i>Acanthocereus</i>	Australia	6	1
<i>Cereus</i>	Australia, Sudáfrica, Namibia	34	3
<i>Harrisia</i>	Australia, Sudáfrica, Namibia	20	4
<i>Hylocereus</i>	Australia, China, Nueva Zelanda, Portugal, Islas del Pacífico, España, Sudáfrica	18	4
<i>Echinopsis</i>	Australia, Sudáfrica	128	3
<i>Myrtillocactus</i>	Sudáfrica	4	1
<i>Peniocereus</i>	Sudáfrica	18	1
<i>Selinicereus</i>	Islas del Pacífico	28	1
Géneros en Pereskioideae	Países donde es invasiva	No. total spp. en el género	No. spp. invasivas
<i>Pereskia</i>	Australia, Sudáfrica	17	1
TOTALS		518	58

**TABLA 2** Mayores invasores exóticos de Opuntioideae: origen, países invadidos, uso, estado y manejo

Especies y origen	Países donde se introdujo e invadió	Uso	Status como invasor	Manejo	Referencias usadas
Género: <i>Austrocylindropuntia</i>					
<i>A. cylindrica</i> (Lam.) Backeb. Ecuador, Perú	Australia	Sin uso	Emerging invader	Control químico	Chinnock, 2015
	Sudáfrica	Ornamental popular en jardines			
<i>A. subulata</i> (Muehlenpf.) Perú, Bolivia	Australia Kenia, Namibia, Sudáfrica, España	Ampliamente usado como cerca viva	Invasor grave en Kenia y emergente en los otros países	Control químico	Chinnock 2015 Walters <i>et al.</i> , 2011
Género: <i>Opuntia</i>					
<i>O. aurantiaca</i> Lindl. Argentina, Uruguay	Australia	Sin uso	Invasor grave	Biocontrol bastante bueno	Hosking <i>et al.</i> , 1988 Zimmermann and Moran, 1982
	Sudáfrica	Sin uso	Invasor grave	Biocontrol bastante bueno	
	Zimbabue	Sin uso	Estatus desconocido	Ninguno	

(continued)

Especies y origen	Países donde se introdujo e invadió	Uso	Status como invasor	Manejo	Referencias usadas
<i>O. cordobensis</i> Speg. (= <i>O. ficus-indica</i>) Argentina	Hawái	Sin uso	Insignificante	Biocontrol bueno	
<i>O. elatior</i> P. Miller Colombia, Venezuela, Panamá	Australia, Indonesia, Kenia	Usado como cerco vivo en Kenia	Problemática solamente en Kenia con poblaciones crecientes	Biocontrol adecuado excepto en Kenia donde es todavía una maleza	Rao <i>et al.</i> , 1971 Hosking <i>et al.</i> , 1988
<i>O. elata</i> Link & Otto ex S-D Argentina, Uruguay	Australia Sudáfrica	Sin uso	Se vuelve cada vez más invasiva en Sudáfrica	Un poco de biocontrol Sin control	Walters <i>et al.</i> , 2011
<i>O. engelmannii</i> S-D ex Eng. (six varieties recognized) USA, México	Australia, Indias del Caribe, Etiopia?, Sudáfrica (variedades <i>engelmannii</i> and <i>lindheimeria</i> son invasivas)	No es utilizada en los países invadidos, utilizada en Texas y México como para ganado	Invasor grave en algunos países	Biocontrol inadecuado en Sudáfrica, manejo desconocido en otros países, <i>C. cactorum</i> tiene impacto en el Caribe	Moran and Zimmermann, 1984b Winston <i>et al.</i> , eds, 2014
<i>O. ficus-indica</i> (L.) Mill. (spiny prickly pear variety) México	Hawái, Sudáfrica Australia, Etiopia, Eritrea, Arabia Saudita y Yemen	Extensivamente usadas en Sudáfrica, Etiopia, Eritrea y Yemen	Percepciones de variedades como maleza, conflictos de interés prevalecen	Biocontrol efectivo en Sudáfrica, Hawái y Australia, grave maleza en otros países donde se hace control limitado	Zimmermann <i>et al.</i> , 2009 Haile <i>et al.</i> , 2002
<i>O. humifusa</i> (Raf.) Raf. este de Estados Unidos	Australia Sudáfrica	Sin uso	Invasor grave en Sudáfrica	Biocontrol exitoso en Sudáfrica	Majure <i>et al.</i> , 2012b,c Walters <i>et al.</i> , 2011
<i>O. leucotricha</i> (DC) Mexico	Australia Sudáfrica	Sin uso	Invasor serio en Sudáfrica	Biocontrol exitoso en Sudáfrica	Majure <i>et al.</i> , 2012b,c Walters <i>et al.</i> , 2011
<i>O. microdasys</i> (Lehm.) Pf Mexico	Australia Sudáfrica	Usado como ornamental únicamente	Se ha vuelto crecientemente invasivo	Sin control	Smith <i>et al.</i> , 2011
<i>O. monacantha</i> (Wild.) Haw. Argentina, Uruguay Brazil	Australia, India, Kenia, Sri Lanka, Mauritania, Madagascar, Sudáfrica	Utilizado intensivamente en Madagascar	Estado bajo después del biocontrol exitoso	Biocontrol exitoso en todos lados	Zimmermann <i>et al.</i> , 2009
<i>O. robusta</i> Wndl (spiny varieties)	Australia Sudáfrica	Se usa como forraje en Sudáfrica	Invasor grave La forma espinosa se vuelve invasiva	Biocontrol parcialmente exitoso	De Kock and Aucamp, 1970 Walters <i>et al.</i> , 2011
<i>O. salmiana</i> Parm ex Pf	Sudáfrica	Sin uso	Invasiones pequeñas en Sudafrica	Objetivo de la erradicacion	Walters <i>et al.</i> , 2011
<i>O. stricta</i> (Haw.) Haw. (including <i>stricta</i> and <i>dillenii</i> subspecies) México, EUA, Caribe	Australia, Angola, Ghana, Kenia, Etiopia, Madagascar, Namibia, India, Sri Lanka, Arabia saudita, Sudáfrica, Yemen	La fruta se consume fresca en algunos pero es principalmente usada en repostería, jugos y los cladodios para tinción no son usados	Invasor grave en la mayoría de los países	Biocontrol eficiente cuando se implementa, otras medidas de control no son económicas	Moran and Zimmermann, 1984b Mann, 1969 Julien and Griffiths, eds, 1998 Zimmermann <i>et al.</i> , 2009

(continued)



Especies y origen	Países donde se introdujo e invadió	Uso	Status como invasor	Manejo	Referencias usadas
<i>O. streptacantha</i> Lem. México	Australia	Sin uso	Pequeñas poblaciones remanentes dejadas	Biocontrol bueno	Mann, 1970
<i>O. tomentosa</i> Salm-Dyck México	Australia Sudáfrica	Sin uso	Pequeñas poblaciones remanentes dejadas	Biocontrol bueno	Mann, 1970
Género: <i>Corynopuntia</i>					
<i>Corynopuntia</i> sp.	Oeste de Australia	Origen desconocido	Maleza emergente	Control químico	Chinnock, 2015
Género: <i>Cylindropuntia</i>					
<i>C. fulgida</i> (Engelm.) F.M. Knuth var. <i>fulgida</i> EUA, México	Sudáfrica Zimbabue	Cercos vivos	Invasor grave	Biocontrol bueno	Paterson <i>et al.</i> , 2011
<i>C. fulgida</i> var. <i>mamillata</i> EUA	Australia Sudáfrica Namibia	Ornamental popular	Invasor grave	Biocontrol bueno	Paterson <i>et al.</i> , 2011
<i>C. imbricata</i> (Haw.) F.M. Knuth EUA, México	Australia Botswana Sudáfrica España Zimbabue Namibia	No utilizado	Invasor grave	Biocontrol moderadamente bueno	Zimmermann <i>et al.</i> , 2009
<i>C. pallida</i> (Rose) F.M. Knuth (= <i>C. rosea</i>) México	Australia Sudáfrica	Introducido como ornamental	Invasor grave	Control químico y biocontrol bajo investigación	Walters <i>et al.</i> , 2011 Laguna <i>et al.</i> , 2013
	Namibia España	Sin uso			
<i>C. kleiniae</i> (DC) Sur de EUA, norte de México	Australia	Sin uso	Invasor emergente	Biocontrol	Chinnock, 2015
<i>C. leptocaulis</i> (DC) F.M. Knuth Sur de EUA, norte de México	Australia Sudáfrica	Sin uso	Invasiones limitadas	Biocontrol bueno	Zimmermann <i>et al.</i> , 2009
<i>C. prolifera</i> (Eng.) F.M. Knuth Sur de EUA, Baja California	Australia	Sin uso	Invasor emergente	Desconocido	Chinnock, 2015
<i>C. spinosior</i> (Eng.) F.M. Knuth Sur de EUA	Australia Sudáfrica	Sin uso	Invasor grave en Australia	Control químico, biocontrol bajo investigación	Chinnock, 2015
<i>C. tunicata</i> (Leh.) F.M. Knuth Sur de EUA, norte de México	Australia Sudáfrica España	Sin uso	Invasor emergente	Control químico	Chinnock, 2015
Género: <i>Tephrocactus</i>					
<i>T. articulatus</i> (Pf) Bkbg Argentina	South Africa Namibia	Popular garden ornamental	Invasor emergente	Control químico	Walters <i>et al.</i> , 2011





Figura 1
Invasión por *Opuntia engelmannii* en Sudáfrica: origen EUA.

De acuerdo con Moran y Zimmermann (1984b), 46 cactus maleza se registraron globalmente en 1983 - llegando a 42 según la última clasificación taxonómica de Hunt (2006) y Anderson (2001)- que indica son adoptadas. En 2014, 57 de las aproximadamente 1,922 especies de cactus reconocidas fueron registradas como invasivas (Novoa *et al.*, 2014). Se considera que ahora se encuentra en 58, pero permanece una buena cantidad subestimada así como una pequeña cantidad de países en desarrollo que tienen un inventario de cactus invasivos. Sudáfrica y Australia son de los focos rojos con invasión, respectivamente con 35 y 27 especies registradas como invasivas (Novoa *et al.*, 2014). Entre 1947 y 2014, 24 cactus invasivos fueron enlistados en Sudáfrica (Petty, 1984; Anon., 2014). Cuando el invasor se ha establecido tiende a expandir drásticamente su rango y son ahora invasivas en muchos países más, con graves

invasiones reportadas desde China, Italia, España, Portugal, Arabia Saudita, Etiopía, Yemen y Francia (Novoa *et al.*, 2014). Muchos cactus notablemente invasores son cultivados o han sido naturalizados en Madagascar, pero no se han reconocido como invasivos (Kull *et al.*, 2012). En 2010, un breve muestreo de cactus invasivos en Namibia reveló 25 especies de invasores graves, pero sin incentivos para su manejo o prevenir nuevas invasiones (Zimmermann, 2011). Únicamente dos especies de nopales introducidos se han registrado en Angola (Figueredo y Smith, 2008). En general, el listado de cactus invasores se ha subestimado fuertemente tomando en cuenta la poca cantidad de especímenes en herbario e inadecuados muestreos. Es difícil preparar buenos especímenes de suculentas para herbario; adicionalmente, muchas muestras incluyendo los especímenes tipo, se han perdido debido a pudriciones o procesamientos deficientes (Anderson, 2001; Chinnock, 2015).

Actualmente los cactus invasores agresivos son tan comunes en jardines privados y públicos en lugares tan leja lejanos como Grecia, Turquía y Croacia. El fácil acceso a los cactus que se sabe son maleza en viveros (**Figura 1**) y en la internet (Humair *et al.*, 2015) inevitablemente incrementará su establecimiento y las subsecuentes invasiones por tales malezas. Afortunadamente los cactus maleza tienden a tener un periodo largo de establecimiento antes de que sean reconocidos como invasores; esto provee la oportunidad para su detección oportuna e iniciativas de respuesta rápida. Se puede esperar un incremento exponencial de invasiones por cactus.

TABLE 3 Especies de Cactoideae y Pereskioideae más invasivas: origen, país de invasión, uso, status y manejo.

Género, especie, origen	Países donde se introdujo e invadió	Uso	Estatus como invasor	Manejo	Referencias
Subfamilia: Cactoideae					
Género: <i>Acanthocereus</i>					
<i>A. tetragonus</i> (L.) Hmlk Centroamérica	Australia	Ornamental	Nada grave y localizado	Ninguno	Mann, 1970
Género: <i>Cereus</i>					
<i>C. jamacaru</i> (DC) Sudamérica	Sudáfrica Namibia	Ornamental	Grave	Control biológico efectivo pero lento	Paterson <i>et al.</i> , 2011
<i>C. hildemianus</i> Schum (= <i>C. uruguayanus</i>)	Sudáfrica	Ornamental	Nada grave	Ninguno	Walters <i>et al.</i> , 2011
<i>C. hexagonus</i> (L.) Mill. Norte de Sudamérica	Australia	Ornamental	Nada grave	Ninguno	Hosking <i>et al.</i> , 1988

TABLE 3 (continuacion) Especies de Cactoideae y Pereskioideae más invasivas: origen, país de invasión, uso, status y manejo.

Género, especie, origen	Países donde se introdujo e invadió	Uso	Estatus como invasor	Manejo	Referencias
Género: <i>Echinopsis</i>					
<i>E. oxygona</i> (Link.) Zucc. ex Pf Noroeste de Argentina	Australia	Ornamental	Nada grave	Ninguno	Novoa <i>et al.</i> , 2014
<i>E. chamaecereus</i> FrdH & Glae	Australia	Ornamental	Nada grave		Novoa <i>et al.</i> , 2014
<i>E. schickendantzii</i> Weber (<i>E. spachiana</i>) Noroeste de Argentina	Sudáfrica	Ornamental	Grave	Control químico limitado	Walters <i>et al.</i> , 2011
Género: <i>Harrisia</i>					
<i>H. balansae</i> (K. Scum) Tayl. & Zappi Argentina	Sudáfrica	Ornamental y bordes	Nada grave y muy localizada	Programa de respuesta rápida enfocada en su eliminación	Walters <i>et al.</i> , 2011
<i>H. martinii</i> (Lab.) Britt. Argentina	Australia Sudáfrica	Ornamental	Nada graves después de un buen biocontrol	Buen control biológico con <i>Hypogeococcus festerianus</i>	Klein, 1999
<i>H. pomanensis</i> (Web.) Britt. & Rose Chaco de Sudamérica	Australia Sudáfrica	Ornamental	Muy localizada	Programa de respuesta rápida en Sudáfrica enfocada en su erradicación	Novoa <i>et al.</i> , 2014
Género: <i>Hylocereus</i>					
<i>H. undatus</i> (Haw.) Britt. & Rose Centroamérica	Sudáfrica	Cultivos comerciales para fruta	Nada grave y localizado	Ninguno	Walters <i>et al.</i> , 2011
<i>H. polyrhizus</i> (Web.) Britt. & Rose	Islas del Pacífico	Ornamental	Estatus desconocido	Ninguno	Novoa <i>et al.</i> , 2014
<i>H. costaricensis</i> (Web.) Britt. & Rose	Islas del Pacífico	Ornamental	Maleza emergente	Ninguno	Novoa <i>et al.</i> , 2014
<i>H. triangularis</i> (L.) Britt. & Rose	España	Ornamental	Maleza emergente	Ninguno	Novoa <i>et al.</i> , 2014
Género: <i>Myrtillocactus</i>					
<i>M. geometrizans</i> (Pf) Cons Centroamérica	South Africa	Ornamental	Nada grave y muy localizado	Ninguno	Walters <i>et al.</i> , 2011
Género: <i>Peniocereus</i>					
<i>P. serpentinus</i> (Lag. & Rodr.) Tayl México	Australia Sudáfrica	Ornamental	Nada grave	Ninguno	Walters <i>et al.</i> , 2011
Género: <i>Selenicereus</i>					
<i>S. macdonaldiae</i> (Hk) Britt. & Rose Honduras	Australia	Ornamental	Nada grave	Ninguno	Randall, 2002
Subfamilia: Pereskioideae					
Género: <i>Pereskia</i>					
<i>P. aculeata</i> Mill.	Sudáfrica Australia	Bordes y sus frutos son usados para repsteria	Grave en Sudáfrica y localizada en Australia	Primer intento de usar control biológico usando dos insectos y control químico	Paterson <i>et al.</i> , 2011



MANEJO DE ESPECIES OPUNTIOIDEAE INVASIVAS

Existe un rango amplio de opciones para el manejo y control de Opuntioideae invasivas:

- Prevención (control previo al ingreso)
- Detección temprana y respuesta rápida;
- Análisis de riesgo;
- Control químico, biológico y mecánico; y
- Aprovechamiento.

El control es a menudo obstaculizado por conflictos de interés: una maleza de nopal puede ser percibida por algunos como beneficio, pero por otros como problemática y requerir de control. Esto puede convertirse en una gran obstáculo para la búsqueda de soluciones, particularmente entre Opuntiae y las tribus Hylocereeae y Cereae.

Figura 2

Invasión por *Opuntia stricta* en Arabia Saudita: origen EUA



¹ Para una actualización más detallada del control biológico de cactus invasores, consulte a Winston et al., eds, (2014) o www.ibiocontrol.org/catalog

Control Biológico

Los primeros reportes de un proyecto de control biológico deliberadamente planeado y exitoso sobre el nopal se remontan a 1913 cuando la cochinilla, *Dactylopius ceylonicus* (Green) fue introducida desde la India para el control de *O. monacantha* en Sudáfrica (Lounsbury, 1915; Zimmermann et al., 2009). Este éxito se repitió en Isla Reunión, Mauritania y Australia, y esto alentó a los científicos en Australia a embarcarse en uno de los más grandes y dramáticos proyectos de control biológico de malezas, denominado, el biocontrol exitoso de *O. stricta* (Haw.) Haw. en Queensland y Nueva Gales del Sur en los años 1920 y 1930 (Dood, 1940; Mann, 1970; Zimmermann et al., 2009). Desde entonces, el control biológico se ha desplegado contra 28 de los cactus invasivos, involucrando ≥ 22 insectos y ácaros plaga del nopal establecidos exitosamente (Zimmermann et al., 2009). Casi el 42% de estos proyectos han sido completamente exitosos; otro 18% ha alcanzado control substancial (Zimmermann et al., 2009; Klein, 2011; Hosking, 2012; Winston et al., eds, 2014). Recientemente, *Cylindropuntia fulgida* var. *fulgida* (Eng.) Knuth y *C. fulgida* var. *mamillata* (**Figure 2**) fueron exitosamente controladas en Sudáfrica (Paterson et al., 2011).

La **Tabla 4** enlista los cactus invasivos más importantes que se han vuelto sujetos de control biológico. El listado no incluye especies que se han tornado invasivas en sus hábitats nativos, y tampoco incluye los agentes de control biológico que no se hayan establecido o no hayan tenido impacto en sus cactus hospederos¹.

TABLA 4 Nopales invasores exóticos: país de introducción y resultado de la deliberada introducción de enemigos naturales para control biológico

Cactus invasor	País donde el control biológico fue introducido	Uso	Estatus como invasor
Subfamilia: Opuntioideae			
Género: <i>Opuntia</i>			
<i>O. aurantiaca</i> Lindl. (Argentina, Uruguay)	Australia	<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Moderado variable
	Sudáfrica		Moderado
	Australia	<i>Zophodia tapiacola</i> (Dyar)	Moderado
	Australia	<i>Dactylopius austrinus</i> De Lotto	Considerable
Sudáfrica	Considerable		
<i>O. elata</i> Link & Otto ex S-D	Australia	<i>Dactylopius ceylonicus</i> (Green)	Trivial
<i>O. elatior</i> Mill. (Centroamérica)	Indonesia	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotipo " <i>ficus-indica</i> "	Extensivo
	Kenia		?
	India		Extensivo

(continuación)

Cactus invasor	País donde el control biológico fue introducido	Uso	Estatus como invasor
<i>O. engelmannii</i> S-D ex Eng. 3 varieties (EUA)	Sudáfrica	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotipo " <i>ficus-indica</i> "	Moderado a trivial dependiendo de la variedad
	Australia		
	Kenia		Desconocido
<i>O. ficus-indica</i> (L.) Mill. (spiny) (México)	Australia	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotipo " <i>ficus-indica</i> "	Moderado
	Sudáfrica		Considerable
	Hawái		Considerable
	Australia	<i>Cactoblastis cactorum</i>	Considerable
	Sudáfrica		Considerable
	Hawái		Considerable
	Isla Mauricio		Considerable
	Sudáfrica	<i>Metamasius spinolae</i> (Gyllenhal)	Considerable (localizado)
	Hawái	<i>Archlagocheirus funestus</i> (Thomson)	Considerable
Sudáfrica	Trivial		
<i>O. humifusa</i> (Raf.) Raf. (EUA)	Sudáfrica	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotipo " <i>stricta</i> "	Extensivo
		<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Trivial
<i>O. leucotricha</i> (DC.) (México)	Sudáfrica	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotipo " <i>ficus-indica</i> "	Moderate
		<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Trivial
<i>O. monacantha</i> Haw. (Sudáfrica)	Australia	<i>Dactylopius ceylonicus</i> (Green)	Extensivo
	India		Extensivo
	Kenia		Moderado
	Sri Lanka		Extensivo
	Madagascar		Extensivo
	Mauritius		Extensivo
	Tanzania		Moderado
	Sudáfrica		Extensivo
	Islas Ascensión		Moderado
	Isla Mauricio		<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)
Sudáfrica		Trivial	
<i>O. robusta</i> (spiny) (EUA)	Australia	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotipo " <i>ficus-indica</i> "	Considerable
	Sudáfrica		Moderado
	Australia	<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Considerable
	Sudáfrica		Considerable
<i>O. salmiana</i> (Parm.) ex Pf (Argentina)	Sudáfrica	<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Trivial
<i>O. stricta</i> ^b (Haw.) Haw. (two varieties) (EUA, México)	Australia	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotipo " <i>stricta</i> "	Inicialmente extensivo
	India		Extensivo
	Kenia		Extensivo
	India		Extensivo
	Namibia		Moderado
	Arabia Saudita		Probablemente extensivo
	Sri Lanka		Considerable



(continuación)

Cactus invasor	País donde el control biológico fue introducido	Uso	Estatus como invasor
<i>O. stricta</i> ^b (Haw.) Haw. (dos variedades) (EUA, México)	Australia	<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Extensivo
	Kenia		Trivial
	Namibia		Moderado
	Nueva Caledonia		Considerable
	Sudáfrica		Moderado
<i>O. streptacantha</i> Lem. (México)	Australia	<i>Moneilema blapsides</i> Newman	Trivial
	Australia	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotipo " <i>ficus-indica</i> "	Considerable
		<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Moderado en plantas jóvenes
		<i>Archlagocheirus funestus</i> (Thomson)	Trivial
		<i>Moneilema blapsides</i> Newman	Trivial
<i>Lagocheirus funestus</i> Thomson	Trivial		
<i>O. tomentosa</i> S-D. (México)	Australia	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell)	Moderado
	Sudáfrica	biotipo " <i>ficus-indica</i> "	Considerable
	Australia	<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Trivial
<i>O. tuna</i> ^a (L.) Mill. (Caribe)	Mauritius	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotipo " <i>ficus-indica</i> "	Inicialmente moderado
		<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Extensivo
Género: <i>Cylindropuntia</i>			
<i>C. fulgida</i> (Eng.) Knuth var. <i>fulgida</i> (Sonora, México, EUA)	Sudáfrica	<i>Dactylopius tomentosus</i> (Lamarck) biotipo " <i>cholla</i> "	Extensivo
	Zimbabwe		Extensivo
<i>C. fulgida</i> (Eng.) Knuth var. <i>mamillata</i> (EUA)	Australia	<i>Dactylopius tomentosus</i> (Lamarck) biotipo " <i>cholla</i> "	Buen progreso
	Namibia		Extensivo
	Sudáfrica		Extensivo
	Zimbabwe		Extensivo
<i>C. imbricata</i> (Haw.) Knuth (México, EUA)	Australia	<i>Dactylopius tomentosus</i> (Lamarck) biotipo " <i>imbricate</i> "	Extensivo
	Namibia		Considerable
	Botswana		Considerable
	Sudáfrica	Considerable	
	Sudáfrica	<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Trivial
<i>C. leptocaulis</i> (DC) Knuth (EUA)	Australia	<i>Dactylopius tomentosus</i> (Lamarck) biotipo " <i>imbricate</i> "	Considerable
	Sudáfrica		Extensivo
<i>C. kleiniei</i> (DC) Knuth (México, EUA)	Australia	<i>Dactylopius tomentosus</i> (Lamarck) biotipo " <i>imbricate</i> "	Considerable
<i>C. rosea</i> (DC) Bkbg (México)	Australia	<i>Dactylopius tomentosus</i> (Lamarck) biotipo " <i>imbricate</i> "	Trivial
Subfamilia: Cactoideae			
Género: <i>Acanthocereus</i>			
<i>A. tetragonus</i> (L.) Hmlk (Argentina)	Australia	<i>Hypogeococcus festerianus</i> (Lizer & Trellis)	Moderado
Género: <i>Cereus</i>			
<i>C. jamacaru</i> (DC) (Argentina, Brasil)	Sudáfrica	<i>Nealcidion cereicola</i> (Fisher)	Considerable
		<i>Hypogeococcus festerianus</i> (Lizer & Trellis)	Considerable

(continuación)

Cactus invasor	País donde el control biológico fue introducido	Uso	Estatus como invasor
Género: <i>Harrisia</i>			
<i>H. balansae</i> (KSch) Taylor & Zappi (Argentina)	Sudáfrica	<i>Hypogeococcus festerianus</i> (Lizer & Trellis)	Considerable
<i>H. martinii</i> (Lab.) Britt. (Argentina)	Australia	<i>Hypogeococcus festerianus</i> (Lizer & Trellis)	Considerable
	Sudáfrica	<i>Hypogeococcus festerianus</i> (Lizer & Trellis)	Considerable
	Sudáfrica	<i>Nealcidion cereicola</i> (Fisher)	Trivial a moderado
<i>H. pomanensis</i> (Web) Britt. & Rose (Argentina)	Sudáfrica	<i>Hypogeococcus festerianus</i> (Lizer & Trellis)	Considerable
<i>H. regelii</i> (Wngt) Borg (Argentina)	Australia	<i>Hypogeococcus festerianus</i> (Lizer & Trellis)	Considerable
<i>H. tortuosa</i> (Otto & Dietr.) Britt. & Rose	Australia	<i>Hypogeococcus festerianus</i> (Lizer & Trellis)	Considerable
Subfamilia: Pereskioideae			
Género: <i>Pereskia</i>			
<i>P. aculeata</i> Mill. (Argentina, Brasil)	Sudáfrica	<i>Phenrica guerini</i> Bechyne	Trivial

^a *O. dillenii* es considerado ahora como una forma espinosa de *O. stricta* y a veces es citada como una subespecie.

^b *O. tuna* ya no es reconocida como una especie (Hunt *et al.*, 2006).

El control biológico de los cactus maleza ha sido generalmente más fácil que el de otras familias de plantas. Esto es debido a la ausencia de especies nativas de cactáceas fuera del continente Americano, con excepción de *Rhipsalis baccifera* (Mill.) Stearn, la cual arribó a Sudáfrica, Madagascar y Sri Lanka probablemente con aves migratorias (Rebman y Pinkava, 2001). Este conjunto de circunstancias ha permitido el uso seguro de insectos fitófagos y ácaros que tienen menos especificidad de hospederos. Sin embargo como el nopal tunero (*O. ficus-indica*) se ha vuelto más importante en el mundo, la selección de agentes de control biológico para nuevos cactus maleza es cada vez más restringido, particularmente en el caso de las opuntias, de manera que la seguridad de este nuevo cultivo mundial no debería estar comprometida. Ha sido cada vez más difícil encontrar enemigos naturales fuera de Dactylopiidae que sean suficientemente específicos de sus hospederos para ser considerados en el control biológico de *Opuntia* invasoras.

Recientemente los éxitos del control biológico de cactus invasores pueden ser atribuidos a nuevos efectos de asociación (Hokkanen y Pimentel, 1989). Esto aplica principalmente para insectos como la cochinilla e implica el uso de agentes de biocontrol que no tengan historia reciente de interacción con el hospedero en tiempo evolutivo. El objetivo es tomar ventaja de la falta de evolución en el comensalismo común para muchos sistemas depredador-presa. Dos biotipos de cochinilla (=genotipos) han sido recientemente identificados y

evaluados *Dactylopius opuntiae* (Cockerell) ("biotipo "stricta") y *D. tomentosa* (Lamarck) (biotipo "cholla") (Githure *et al.*, 1999; Volchansky *et al.*, 1999; Mathenge *et al.*, 2009; Jones *et al.*, 2014) proveen excelente control de *O. stricta* var. *stricta* y, *C. fulgida* var. *fulgida* y *C. fulgida* var. *mamillata* resp., no sólo en Sudáfrica sino también en Australia, Kenia y Arabia Saudita (Paterson *et al.*, 2011). Investigaciones adicionales están enfocadas en encontrar nuevos biotipos de cochinilla para *O. engelmannii*, *O. elata* S-D, *C. pallida* (Rose) Knuth y *C. spinosior* (Eng.) Knuth. La existencia de biotipos adaptados a sus hospederos dentro de las especies de piojos harinosos, *Hypogeococcus festerianus* Granara de Willink, para controlar invasores en el género *Harrisia* y *Cereus*, no debería ser descartado. Los prospectos de control biológico de nuevos invasores de Cactoideae son generalmente muy buenos.

Los riesgos del control biológico son mínimos. No hay casos conocidos de efectos imprevistos de agentes de control biológico de cactus sobre especies no objetivo. Los artrópodos cactófagos son conocidos como específicos de hospederos especies de Cactaceae; ya que la familia es endémica del continente Americano, es muy improbable que suceda un cambio de hospedero imprevisto hacia otra familia de plantas fuera de su rango nativo. La palomilla del nopal *Cactoblastis cactorum* (Berg) y la cochinilla *D. opuntiae*, se sabe que tenían muchos hospederos dentro del género *Opuntia*; se predijo que ambos insectos se podían establecer sobre nopal tunero y *Opuntia* invasivas. El uso de estos dos



insectos para control biológico se basó en un riesgo calculado, dada la seriedad de la invasión de nopales en ese momento. Por otra parte, la deliberada introducción de la palomilla del nopal a algunas islas del Caribe en 1957 fue más desafortunada y mal concebida (Zimmermann *et al.*, 2001). Se introdujo para el control de *O triacantha* (Willd.) Sw indígena y se sabe que la palomilla se pudo desarrollar en muchas otras especies del género *Opuntia* en las Indias del Oeste. Al mismo tiempo, la palomilla se dispersó a la plataforma continental de América a través del comercio de plántulas (Pemberton, 1995), vía eventos climatológicos o por múltiples introducciones directamente de Sudamérica (Marsico *et al.*, 2011). Ahora está amenazando especies nativas de *Opuntia* en los Estados Unidos de América y México.

La cochinilla *D. opuntiae*, ampliamente usada como un agente de control biológico fuera de su rango nativo (Estados Unidos de América y México), pudo haberse llevado como un contaminante en material vegetativo de plantas a varios países, incluyendo la región del Mediterráneo. Se ha introducido inadvertidamente, erróneamente como la grana cochinilla *D. coccus*. En adición, desde que ésta se ha dispersado, hay una oportunidad muy remota de que alcance plantaciones de nopal tunero a través de corrientes de aire, especialmente donde las plantaciones están cerca de poblaciones de *Opuntia* invasivas infestadas con el insecto. Esto solo pudo suceder cuando *D. opuntiae* fue usada como control biológico, e.g., en Sudáfrica, India, Sri Lanka, Kenia, Indonesia, Australia, Hawái e Isla Mauricio. Esto es vital para asegurar que solamente el material vegetativo libre de contaminantes sea usado para plantaciones nuevas de nopal tunero.

Control mecánico y químico

El control mecánico es raramente una opción viable para lidiar con invasiones de nopal, debido a que la reproducción vegetativa es posible desde pequeños fragmentos que permanecen después del control físico. El control químico se recomienda cuando invasiones pequeñas y nuevas se han confinado, controlado a aun erradicado, pero es a veces viable cuando poblaciones grandes y extendidas requieren ser controladas. Varias campañas químicas en la historia del control de nopal han fallado debido a los costos involucrados y la rápida recuperación de poblaciones: el control químico nunca termina (Dodd, 1940; Annecke y Moran, 1978; Moran y Annecke, 1979).

Las capas gruesas de cera protectora y la ruta fotosintética del metabolismo ácido crasuláceo (CAM) en la mayoría de los cactus (estomas cerrados durante el día) restringe severamente el consumo de herbicidas aplicados de manera foliar, a menos que se usen aditivos humectantes efectivos. La mayoría de los cactus invasores, sin embargo, requieren por si mismos tratamientos

de inyección al tallo con herbicidas sistémicos debido a su naturaleza suculenta. Las ventajas son rápida translocación a todas las partes de la planta, reduciendo el daño a especies no objetivo y disminuyendo costos. El acceso a ciertos tallos en forma de matorral y nopales espinosos es un problema potencial cuando se usa el método de inyección al tallo (Grobler, 2005).

Prevención

Se está realizando investigación para prevenir la introducción y establecimiento de nuevos cactus invasivos. Las iniciativas incluyen control estricto antes y después de la frontera, análisis de riesgo antes de que una especie sea introducida e identificación y regulación de rutas potenciales de introducción (Novoa *et al.*, 2015). La legislación puede jugar un papel importante en la prevenir el establecimiento de nuevas invasiones o en el control de cactus invasivos. Esto puede incluir la compilación de listados de especies prohibidas y de especies con medidas de control establecidas. En Sudáfrica, 34 especies de cactus se han listado en varias categorías de plantas exóticas invasivas en términos de las regulaciones por la Autoridad Nacional de Manejo Ambiental (NEMA por sus siglas en inglés), lo cual hace el control obligatorio (Anon., 2014).

Un análisis de los 57 cactus invasores a escala mundial muestra que las especies en algunos géneros son más sujetas a volverse invasoras que las especies de otros. En el género *Opuntia* solamente, 26 especies (de un total de 181) son ya invasivas en alguna parte del mundo. De forma similar en el género *Harrisia*, cinco especies (de un total de 20) son ahora invasivas. Esto puede por lo tanto, ser justificable para un país en particular declarar a un género completo como no deseable. Este enfoque ya se está aplicando en Sudáfrica, donde se ha prohibido la introducción de todas las nuevas especies en el género *Cylindropuntia*, *Harrisia* y *Opuntia* (Anon., 2014), mientras aquellas especies que ya se han naturalizado (excepto para las que son comercialmente valiosas) son sujetas a control obligatorio (Anon., 2014). Con la excepción de *O. ficus-indica* sin espinas, todas las especies del género *Opuntia*, *Austrocylindropuntia* y *Cylindropuntia* son declaradas "malezas de importancia nacional" en Australia (el género *Corynopuntia* puede ser adicionado a la lista) (Chinnock, 2015). Es altamente improbable que los permisos sean otorgados para la introducción de cualquiera de las especies en estos géneros. Otros países pueden considerar legislaciones similares.

Existen más de 800 especies de cactus ornamentales en el comercio, incluyendo 25 conocidas como invasoras (Novoa *et al.*, 2016). Al menos 266 de estas especies se han introducido a otros países principalmente como semillas. Separar tal cantidad de especies introducidas, por aquellas que están prohibidas o son potencialmente



invasivas es un desafío, especialmente cuando son importadas como semillas (Humair *et al.*, 2015), y Nueva Zelanda es el único país que realiza la separación de semillas en el comercio entrante. Sin embargo, una regla general es que las especies con semillas más grandes y pesadas son más propensas a ser invasivas que aquellas con semillas pequeñas (Novoa *et al.*, 2016) (hay excepciones en el género *Echinopsis*, *Cereus* y *Harrisia*). La mejor opción para prevenir la introducción de especies dañinas puede ser el análisis de riesgo a nivel de género, realizado con ayuda de los importadores y el comercio hortícola de cactus. Existe una recomendación de que todos los géneros que contengan especies invasivas deberían ser prohibidos. Por ahora Sudáfrica tiene únicamente prohibida la importación de especies que no estén todavía en el país en el género *Opuntia*, *Cylindropuntia* y *Harrisia* (Anon., 2014). La mayoría de los cactus en el comercio internacional pertenecen a géneros sin especies invasivas registradas. A la fecha, ninguna especie invasiva ha sido reportada en el extenso género *Mamillaria*; este grupo de ornamentales muy popular que podría ser excluido de la regulación.

Otras características pueden ser útiles en el análisis de riesgo de plagas son las estrategias de reproducción y la dispersión por vectores.

USOS Y CONFLICTOS DE INTERES

Una cultura de uso de especies de cactus (principalmente *Opuntia*) se ha desarrollado por miles de años, principalmente en México y algunos países de Centro y Sudamérica. En los últimos 400 años, cuando una planta se introduce a otro país, la cultura de su uso no ha sido siempre transferida junto con ésta. En los países donde el nopal tunero se introdujo (*O. ficus-indica* espinosa) se ha vuelto invasiva, ha habido un claro cambio desde "útil" durante su establecimiento a "problemática" con la subsecuente fase de expansión hasta que eventualmente es percibida como un desastre nacional. Sin embargo, recientemente ha habido un resurgimiento significativo de los múltiples usos del nopal tunero (*O. ficus-indica* sin espinas) y este también puede ser aplicado para la tuna. Existe un rango amplio de literatura sobre sus usos, incluyendo muchas recetas y productos de "tuna" (frutos) y nopalitos (cladodios tiernos usados como verdura) y algunas aplicaciones médicas (De Waal *et al.*, 2015; Sáenz *et al.*, eds, 2006). El uso de partes vegetativas de *O. ficus-indica*, *O. robusta* y más recientemente *N. cochenilifera* como recurso de forraje se está practicando cada vez más; en algunos países como Brasil, se ha convertido en una industria sustancial (Mondragón Jacobo y Pérez González, 2001; Dubex *et al.*, 2015a). *Opuntia ficus-indica* también es el principal hospedero para la producción de grana cochinilla *D. coccus* (Costa), cuya mayor industria se encuentra en Perú (Flores Flores

y Tekelenburg, 1995). Ha habido esfuerzos importantes para aplicar estos múltiples usos para poblaciones invasivas de nopal tunero, en un intento de revertir el status de invasor y transformarlo en un activo. Sin embargo, su aprovechamiento solo no es suficiente, para disminuir las densidades y dispersión del nopal tunero en Eritrea, Yemen y Etiopía, donde muchos miles de hectáreas están invadidas y expandiéndose.

Hay mucho que aprender de los países donde los cactus de las tres subfamilias han sido ampliamente aprovechados por las civilizaciones durante miles de años como México (Hoffmann, 1995; Anderson, 2001). En México, existen invasores agresivos bien reconocidos, por ejemplo, *Cyl. Imbricata* (Haw) Knuth y *O. engelmannii* son ampliamente usados para forraje (Benson, 1982; Nobel, 1994).

Tomó muchos años de debate y negociaciones antes de que se decidiera embarcarse en un programa de control biológico contra el nopal tunero (*O. ficus-indica*) para detener invasiones posteriores en Sudáfrica (Annecke y Moran, 1978). Dos enemigos naturales, la palomilla del nopal (*C. cactorum*) y la cochinilla (*D. opuntiae*) fueron liberados en 1933 y 1938 respectivamente. El siguiente éxito en el control biológico (Petty, 1948), se realizó un esfuerzo para utilizar pequeñas infestaciones remanentes a fin de reducir su status como invasora (Brutsch y Zimmermann, 1933, 1955). Hoy en día, estas infestaciones remanentes son bien utilizadas, principalmente como recurso de frutos; el control no se requiere más, excepto en situaciones particulares, como en la conservación de áreas (Beinart, 2003). En contraste, en Etiopía (la provincia de Tigray) y Eritrea no se ha implementado el control biológico y es poco probable que se haga en el futuro; consecuentemente, infestaciones densas de > 300 000 has persisten solamente en Etiopía (Behailu y Tegegne, 1997; Haile *et al.*, 2002). Los productores locales se han vuelto muy dependientes del nopal tunero ya que queda poca vegetación natural y son reacios para destruir aun parte del cultivo a través del control biológico, porque temen perder el recurso que es ahora indispensable. A pesar de los esfuerzos por la FAO de promover nuevos usos y mejorar el uso del fruto y el forraje, no existe evidencia de la reducción de las infestaciones (Portillo, comunicación personal). En otros países con invasiones importantes, tales como Arabia Saudita y Yemen, la implementación de programas activos tiene que comenzar mientras las poblaciones de nopal tunero siguen creciendo.

Madagascar es un caso especial: no se trata del nopal tunero (*O. ficus-indica*), sino *O. monacantha* (raqueta) que invadió partes importantes del sur de Madagascar. El nopal fue intensivamente utilizado, - principalmente como recurso forrajero y fruto - hasta que la población local se volvió completamente dependiente de esta (Middleton, 1999; Kaufmann, 2001). Sin embargo, algunos locales vieron al nopal como un problema (Kaufmann, 2001).



Invasiones similares a gran escala sucedieron en la India, Australia, Isla Mauricio, Sri Lanka y Sudáfrica, pero la maleza no fue utilizada, excepto por un breve periodo en la India cuando se utilizó para criar grana cochinilla del nopal *D. coccus* (Zimmermann *et al.*, 2009; Winston *et al.*, eds, 2014). La introducción de la cochinilla *D. ceylonicus* a Madagascar en 1924 (aparentemente erróneamente confundida con *D. coccus*, con la intención de iniciar la industria de la grana cochinilla) resultó en la destrucción de prácticamente todas las poblaciones de nopales en cuatro años (Middleton, 1999). Esto produjo una severa necesidad entre la población local. De acuerdo con Middleton (1999), la rehabilitación de pastos después de la extinción del nopal fue tan lenta para mantener el mismo nivel de pastoreo, que resultó en la muerte de ganado. Los conflictos de interés entre los pastores, comunidades locales, autoridades y políticos está bien documentada por Middleton (1999) y Kaufmann (2001, 2004). Parece ser que la gente de Madagascar aprendió a vivir con esta especie transformadora, involucrando un uso intensivo de esta especie exótica como nuevo recurso (Kull *et al.*, 2012, 2014), en parte porque no tenían otra opción. La invasión de *O. ficus-indica* en Tigray (Etiopia) ofrece aspectos paralelos.

En Sudáfrica, por otro lado, se presentó un conflicto serio por varios años sobre el inicio o no de un programa de control biológico contra *O. ficus-indica* (Beinart, 2003). Un proyecto fue lanzado finalmente en 1932 y el control biológico redujo infestaciones por alrededor del 80%, dejando suficientes plantas para ser ampliamente utilizadas por la población rural (Annecke y Moran, 1978). Los ganaderos nunca fueron dependientes del nopal tunero como en Madagascar, y las deficiencias resultantes fueron parcialmente cubiertas por el nopal tunero sin espinas *O. robusta*, un proyecto iniciado por el Gobierno de Sudáfrica para compensar la pérdida del nopal para forraje y fruto (Beinart, 2003). La resistencia al control biológico de las invasiones del nopal tunero en algunos países es entendible; esta resistencia se agrava cuando aumenta la dependencia sobre las poblaciones de la planta como en Etiopia, Eritrea y Yemen.

Recientemente, invasiones severas de *O. stricta*, *O. dillenii* (Ker-Gawler) Haw. (= *O. stricta* var. *dillenii*), *O. elatior* Mill. y *O. engelmannii* surgen a una proporción alarmante en Madagascar, Etiopia, Yemen, Somalia, Angola, Namibia y Kenia. Dado que el agente de biocontrol más eficiente no es específico de un hospedero, y debido a los conflictos de interés (pasados y presentes) en algunos de estos países, hay pocas oportunidades de implementar el control biológico en estas especies. El beneficio de los análisis de riesgo podrá demostrar eventualmente que el control biológico puede ser considerado parte de un plan emergente, aun si este implica

un leve daño para especies cultivadas. La mayoría de las invasiones de cactus se encuentran más allá de la fase donde el control químico pueda ser implementado. Al momento, la opción de control biológico puede ser más convincente y hasta puede eventualmente volverse parte de un programa de manejo integrado más amplio.

El biotipo "ficus" de la cochinilla *D. opuntiae*, se ha convertido una plaga del nopal tunero cultivado, no solo donde el biocontrol ha sido deliberadamente implementado., también en otros países como Brasil, Marruecos, España, Egipto y Líbano, donde la cochinilla fue accidentalmente introducida. Otro nivel de conflicto de interés puede desarrollarse conforme algunos países contemplan la introducción de depredadores de la cochinilla desde México para el control biológico de la cochinilla en cultivos de nopal tuero. Estos depredadores no son específicos de hospedantes y pueden controlar todas las especies y biotipos de *Dactylopius*, incluyendo aquellas que son vitales para el control de varias cactáceas invasivas. Esto puede reducir severamente la eficacia del control biológico. Por esta razón, Sudáfrica tiene una moratoria en la importación y liberación de cualquier depredador que pueda impactar negativamente los enemigos naturales de la cochinilla. Desafortunadamente, cualquier liberación de depredadores en el norte de África puede eventualmente migrar al sur hacia países que dependen de la cochinilla para el control biológico de los cactus invasivos.

CONCLUSIONES

El nopal tunero es un cultivo de múltiples propósitos en tierras áridas destinado a volverse más importante conforme el calentamiento global y la desertificación se incrementan. Ofrece un gran potencial para países en desarrollo y regiones áridas. Al mismo tiempo, sin embargo estos países, encaran el problema del escalamiento de cactus invasores. Aprovechamientos innovadores de estos cactus, principalmente del género *Opuntia*, pueden ser una vía para aliviar parcialmente la amenaza. Una solución más factible es la prevención de su introducción y establecimiento de nuevas invasoras en primer lugar. Se requiere investigación para encontrar innovaciones e integrar métodos para manejar estas invasiones. Se recomienda que la investigación se enfoque en el uso de grandes biomásas de muchas especies invasivas. En algunos casos puede ser posible encontrar nuevas especies más específicas como agentes de control biológico, incluyendo nuevos biotipos de cochinilla, los cuales podrían resolver algunos de los problemas (Zimmermann *et al.*, 2009). Expertos en invasiones en Sudáfrica y en otros lugares han emprendido investigaciones importantes para predecir nuevas invasiones,



particularmente dentro del comercio de plántulas suculentas. Los conflictos de interés hasta ahora han sido confinados a *Opuntia*, pero también los nuevos cultivos emergentes en el género *Cereus* y *Hylocereus* (Nerd., 2002), ambos contienen especies invasivas, pueden ocasionar que surjan nuevos conflictos. Los enemigos naturales (e.g. *H. festerianus*) han sido liberados para el biocontrol de especies de *Harrisia* y *Cereus* invasivas en Australia y Sudáfrica se sabe que tienen potencial de ocasionar daños a varias especies de las tribus Cereeae y Trichocereae (McFadyen, 1979; McFadyen y Tomley, 1981).

Comparado con los 20 años previos, existen muchos nuevos invasores de la subfamilia Cactoideae, originados principalmente por el comercio de plántulas. Esta tendencia parece continuar. Muchos de los nuevos cactus invasores se encuentran en espera, listos para moverse a la fase exponencial de

la invasión. Solamente en Madagascar, de las 52 especies de cactus que son cultivadas o han sido naturalizadas, solo dos son consideradas como invasivas (Kull et al., 2012, 2014). De las 50 especies restantes, 24 han sido registradas como invasivas en otros países (Tablas 2 y 3), incluyendo algunos de los peores cactus maleza invasivos conocidos: *O. aurantiaca*, *O. stricta*, *O. dillenii*, *C. leptocaulis*, *C. tunicata* y *Harrisia* spp.

Con excepción de los insectos enemigos asociados con el género *Harrisia* (McFadyen, 1979) en Sudamérica, los insectos cactófagos asociados con la subfamilia Cactoideae no han sido ampliamente estudiados, a diferencia de los asociados en general con Opuntioideae (Mann, 1969). Existen buenos prospectos para encontrar enemigos naturales efectivos y específicos de hospederos, que deberán volverse necesarios para el control biológico.



Figura 3
Invasión de *Opuntia ficus-indica* en Sudáfrica: origen México.

Figura 4
Invasión de *Opuntia robusta* en Australia: origen México.

Figura 5
Invasión de *Opuntia humifusa* después del control biológico en Sudáfrica: origen EUA.

Figura 6
Invasión de *Opuntia humifusa* después del control biológico en Sudáfrica. Foto: Helmut Zimmermann.

Figura 7

Invasión de *Opuntia stricta* en Etiopía.

**Figura 8**

Invasión de *Opuntia aurantiaca* en Sudáfrica y Australia: origen Argentina.

**Figura 9**

Excelente control biológico de *Opuntia stricta* en Sudáfrica, Kenia, Arabia Saudita y Australia usando la cochinilla *Dactylopius opuntiae* biotipo "stricta" específica de hospedero.

**Figura 10**

Invasión de *Opuntia stricta* en el Parque Nacional de Tsavo, Kenia antes del control biológico (2012). (foto A. Witt).

**Figura 11**

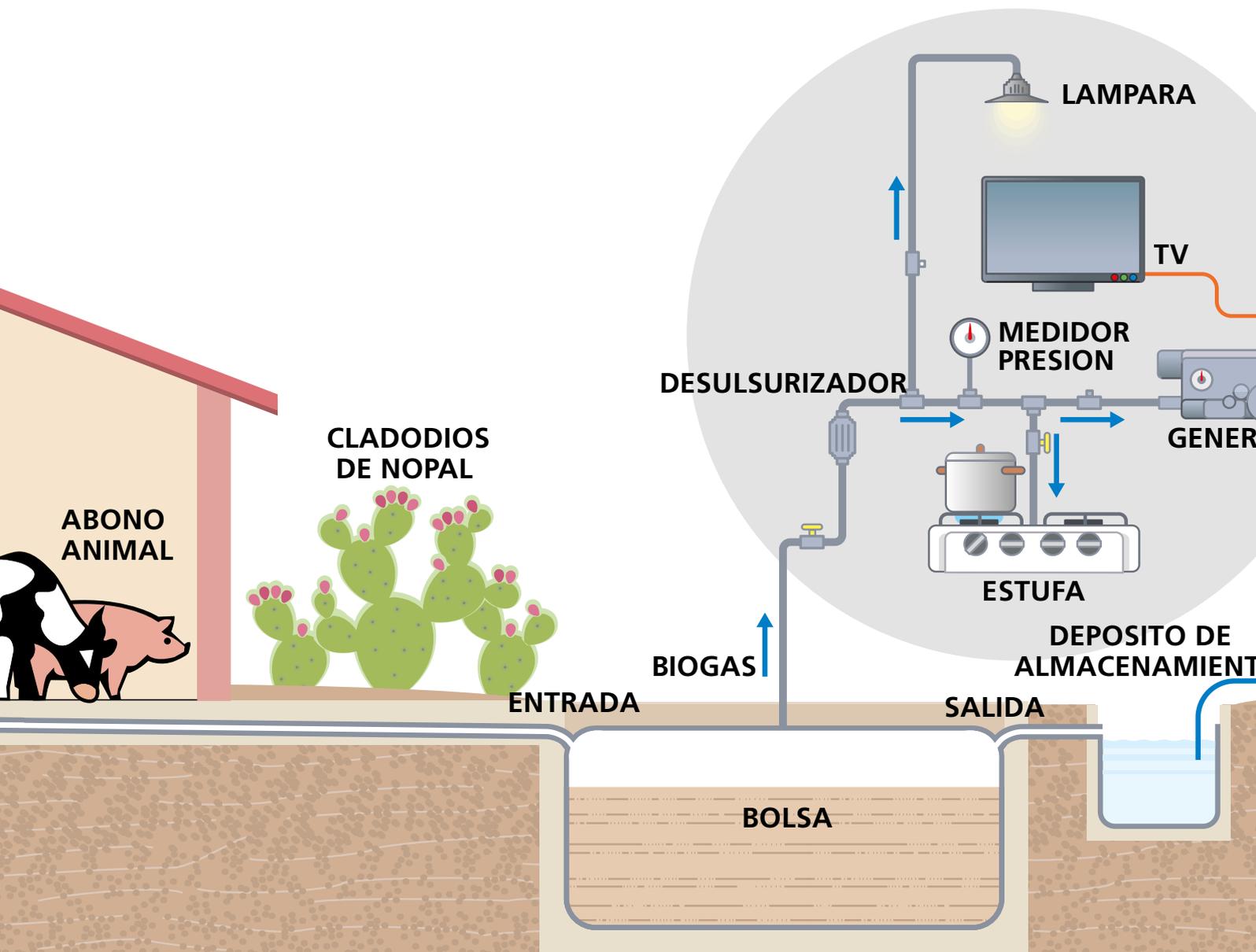
La misma localidad después del control biológico usando un biotipo de *Dactylopius opuntiae* específica de hospedero (2015). (foto A. Witt).



Producción de biogás

Maria Teresa Varnero y Ian Homer

Departamento de Ingeniería y Suelos. Facultad de Ciencias Agrícolas
Universidad de Chile



INTRODUCCIÓN

Las energías no convencionales renovables (ENCR) están volviéndose prominentes, proveyendo fuentes de energía compatibles con la sostenibilidad ambiental y humana. Las ENCR incluyen varias formas de: energía eólica, hidráulica en pequeña escala, mareas, geotérmica y de biomasa. Las de biomasa usan procesos biológicos, químicos y físicos para generar biocombustibles líquidos y gaseosos, tales como el biodiesel, bioetanol y biogás.

El biogás es una forma de energía viable y esencial en las áreas rurales y agrícolas, obtenido del proceso de desechos orgánicos a través de la digestión anaeróbica. Además del biogás (que comprende principalmente metano y dióxido de carbono y otros gases traza), el proceso produce un desecho orgánico estabilizado, el digestado (también conocido como biol o biofertilizante (Varnero, 1991, 2001).

La tasa de biodegradación de los residuos orgánicos está relacionada con la actividad microbiana en un sistema anaeróbico. Esta actividad depende del tipo de materia prima, el pH del medio, el nivel total de sólidos, la temperatura del proceso y otros parámetros que determinan el periodo de la digestión para la producción del biogás y el biofertilizante.

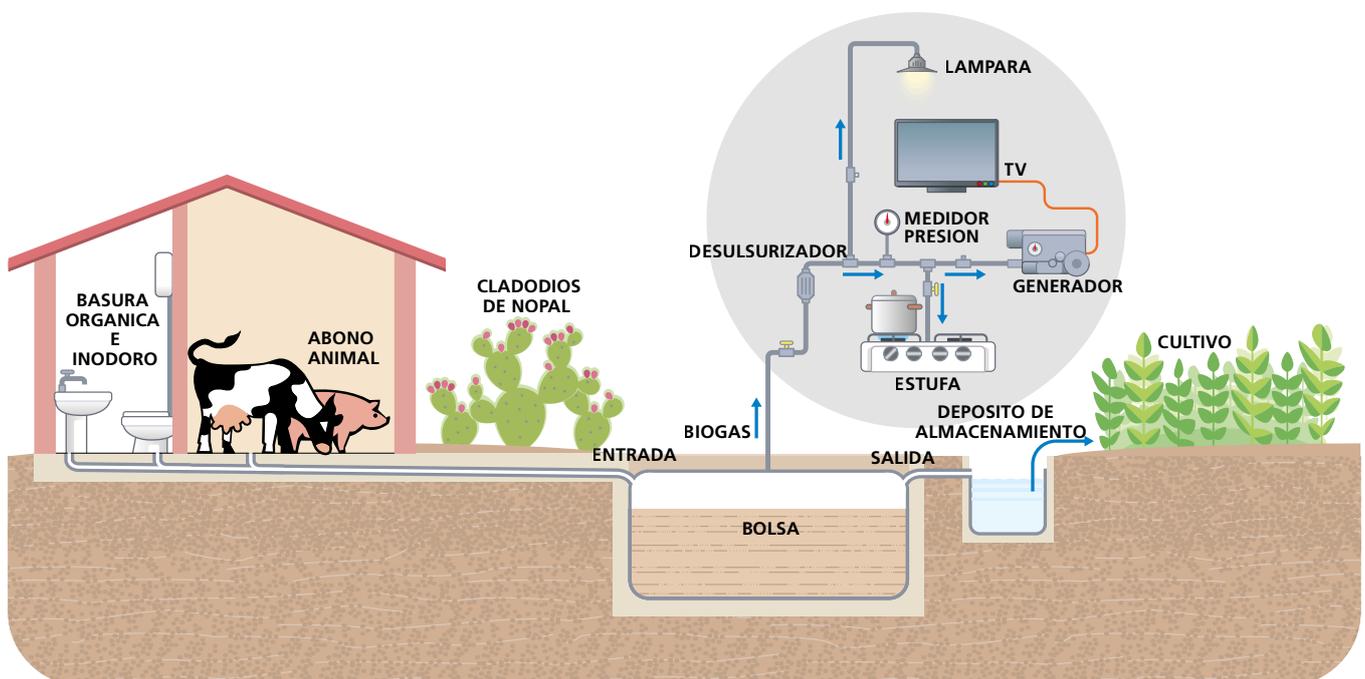
USO DE DESECHOS DE NOPAL EN LA PRODUCCION DE BIOGAS

Las zonas áridas presentan una reducida disponibilidad de desechos orgánicos, desventaja obvia para la producción de biogás. Este obstáculo puede ser resuelto desarrollando cultivos energéticos bien adaptados a las zonas áridas, en este contexto, las opuntias -entre ellas *O. ficus-indica* (L) Mill., caracterizada por su metabolismo CAM, son recomendadas como fuentes alternativas de energía debido a que tienen alto potencial para la producción de biomasa (García de Cortázar y Nobel, 1992; García de Cortázar y Varnero, 1995). Los productores pueden así reducir sus gastos en electricidad y gas (gas licuado derivado del petróleo, o GLP) produciendo su propia energía, y mejorando al mismo tiempo la calidad y condiciones del suelo mediante la aplicación del digestado a los campos.

En la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Chile, los experimentos con nopal (*O. ficus-indica*) (Uribe *et al.*, 1992, Varnero *et al.*, 1992; Varnero y Garcia de Cortazar, 1998) indicaron que los cladodios no son un buen material metanogénico. La calidad del material inicial en los digestores, particularmente con la carga inicial (Hilbert, 2009) es vital para el proceso. Por lo tanto es necesario incluir

Figura 1

Tamaño del sistema familiar de biogás



un material particular derivado de otro digestor y enriquecido con bacterias metanogénicas, o incorporar un porcentaje de abono animal. Tales ajustes avanzan el proceso del inicio de la producción de biogás. Asimismo, el pH de la pulpa es muy bajo, lo cual también afecta la producción de biogás, por esta razón es preferible mezclar con otros materiales, principalmente abono animal.

La eficiencia de fermentación de las mezclas conteniendo diferentes concentraciones de cladodios y estiércoles mostro que es crucial mantener el pH de la mezcla cercano a 6, para poder obtener biogás con un contenido de metano >60%. La composición del biogás producido por fermentación metanogénica esta cercanamente relacionada con el pH de los materia prima biodigerida. A pH <5.5 el biogás es predominantemente dióxido de carbono, con combustibilidad y contenido de energía reducidos, en contraste, con un pH neutro o básico, el biogás es rico en metano. Es por lo tanto importante incrementar la proporción de estiércol en la mezcla y el uso de cladodios mayores a 1 año de edad. El tamaño de partícula del material picado no tiene influencia significativa en la eficiencia del proceso de fermentación (Varnero y López, 1996; Varnero y García de Cortázar, 1998).

Durante la digestión anaeróbica del abono animal, la adición de cladodios de nopal promueve la fermentación metanogénica, asumiendo que el pH de las mezclas de los materiales iniciales permanecen cercanos a la neutralidad o acidez ligera. Asimismo, la adición de un porcentaje apropiado de cladodios los estiércoles ayuda a que la fermentación comience antes (Uribe *et al.*, 1992; Varnero *et al.*, 1992): el contenido de carbón y energía de los cladodios favorece el desarrollo de bacterias acidogénicas, las cuales generan el subs-

trato requerido para las bacterias metanogénicas, acelerando así el proceso de metanogenesis y la reducción del tiempo requerido para esta actividad (Varnero and García de Cortázar, 2013).

PLANTACIONES DE NOPAL PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS

Los nopales pueden ser cultivados exitosamente en un amplio rango de suelos y climas, por lo que se pueden establecer plantaciones especiales para optimizar la producción de biomasa, cuya evaluación económica está todavía pendiente.

Los estudios han mostrado que una hectárea de nopal sobre un periodo de 5 años produce hasta 100 ton de cladodios frescos por año en áreas con lluvia tan escasa como 300 mm (García de Cortázar y Nobel, 1992). En algunas zonas semiáridas de México, los cladodios son tradicionalmente colectados de plantas silvestres para usarlos como forraje, la poda regular incrementa el rendimiento y mejora la calidad de los nopalitos o la fruta.

La poda puede rendir aproximadamente 10 ton de materia seca (MS) por ha⁻¹ ao⁻¹, y los residuos pueden ser usados para la producción de biogás, composta o alimento animal (García de Cortázar y Varnero, 1995). La poda puede proveer también material para alimentar los biodigestores, combinados con estiércoles. Los cladodios maduros (1 año de edad) son cortados, picados y depositados directamente en los digestores, es importante usarlos tan pronto como han sido picados, para reducir la biodegradación y mejorar la eficiencia de la producción de biogás y biofertilizante. Si la capacidad del digestor no es suficiente para un uso inmediato, los cladodios pueden ser almacenados en un sitio

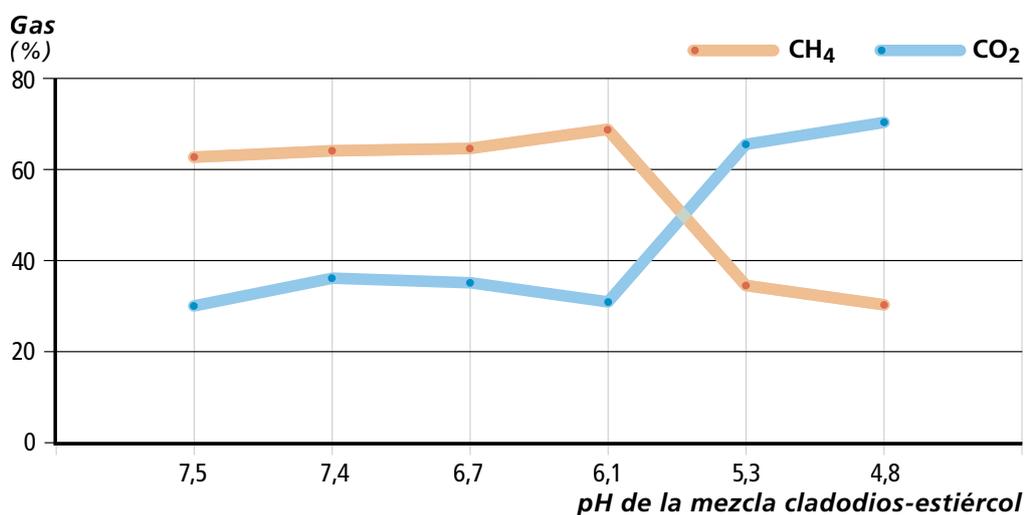


Figura 2
Composición de biogás en función del pH de la mezcla cladodios-estiércol (Varnero and Arellano, 1991)

sombreado seco y fresco por algunos días (Varnero and García de Cortázar, 2013).

Conforme la plantación madura el crecimiento de los cladodios decrece, debido a que tasa de fotosíntesis neta disminuye como efecto del sombreado de los cladodios superiores (Acevedo y Doussoulin, 1984). Sin embargo, el contenido de materia seca no es afectado dado que el crecimiento continua a través del año. En Chile, el rendimiento comercial máximo de fruta fresca se estima en 16 ton ha⁻¹ con plantas de 16-20 años de edad con buen manejo. Este comienza a declinar entre los 21 a 35 años, bajando a 8 ton ha⁻¹ (Acevedo y Doussoulin, 1984; Pimienta Barrios, 1990). Durante la primera cosecha que va de enero a abril, el rendimiento es de 5-16 ton ha⁻¹ mientras que en la segunda cosecha de junio a septiembre se obtienen solamente 0.5 ton ha⁻¹ (Sudzuki *et al.*, 1993).

Toha (1999) indica que 3 kg de cladodios secos producen 1 m³ de biogás, lo cual es equivalente a un rendimiento de 10 kWh. También Baeza (1995) señaló que el valor calorífico del biogás de nopal es de 7.058 kcal m⁻³ (rango de 6 800 a 7 200 kcal m⁻³) y que el potencial del biogás de nopal es equivalente a 0.360 m³ kg⁻¹ MS.

• **Escenario 1: baja producción.** Con un rendimiento de 10 ton de MS ha⁻¹, el potencial de producción de biogás es equivalente a 9.86 m³ de biogás por día⁻¹ (27.40 kg MS día⁻¹, con

un potencial estimado de 0.36 m³ biogás kg⁻¹ (27.40 x 0.360 = 9.86 m³ de biogás por día⁻¹).

• **Escenario 2: condiciones intermedias.** PProducción de residuos de cosecha de 18 ton ha⁻¹ año⁻¹ generan 17.75 m³ de biogás día⁻¹ y 49.3 kg MS por día⁻¹.

• **Escenario 3: producción óptima.** Una plantación comercial con riego y fertilización puede producir ≤30-40 ton MS ha⁻¹ (García de Cortázar y Nobel, 1992; Franck, 2006). La producción de 30 to año⁻¹ es equivalente a 82.2 kg día⁻¹, la cual puede ser usada como materia prima para la producción de biogás con un potencial de 29 m³ día⁻¹ (82.2 x 0.360 = 29 m³ ha⁻¹ año⁻¹) o 10 885 m³ ha⁻¹ año⁻¹ de biogás, comparable con 6.4 ton de petróleo (Varnero, 1991).

TEXiste una diferencia significativa entre la producción de biogás entre el mejor y peor escenario como resultado de las limitantes implicadas.

Basado en el sistema familiar para operaciones pequeñas ilustrado en la **Figura 1**, los desechos orgánicos pueden ser colectados de los sanitarios al biodigestor, y/o por acumulación de los desechos de cocina. Adicionalmente, si hay animales domésticos (e. g. una vaca y dos cerdos) también podrían contribuir con materia orgánica (**Tabla 2**). Esto podría tener un potencial de biogás de 1.05 m³, dejando 2.6 m³ extra para alcanzar los 3.61 m³ requeridos. Para determinar el mínimo de nopal a plantarse requeridos para suministrar

Ejemplo practico

TABLA 1 Consumo promedio de energía de biogás para una familia de 5 personas

	Consumo promedio de biogás	Consumo de biogás de nopal
	Valor calorífico 5 000 kcal m ⁻³	Valor calorífico 7 058 kcal m ⁻³ (75% de CH ₄)
Cocina (5 h)	0.30 m ³ h ⁻¹ × 5 h = 1.50 m ³ día ⁻¹	0.21 m ³ h ⁻¹ × 5 h = 1.05 m ³ día ⁻¹
3 lámparas (3 h)	0.15 m ³ h ⁻¹ × 3 h × 3 = 1.35 m ³ día ⁻¹	0.11 m ³ h ⁻¹ × 3 h × 3 = 0.99 m ³ día ⁻¹
Medio de enfriamiento	2.20 m ³ h ⁻¹ × 1 = 2.20 m ³ día ⁻¹	1.57 m ³ h ⁻¹ × 1 = 1.57 m ³ día ⁻¹
Total	5.05 m³ día⁻¹	3.61 m³ día⁻¹

Fuente: Baeza, 1995.

TABLA 2 Resumen de cálculos

	Cantidad (Unidades)	Kg unidades ⁻¹	kg	Potencial de biogás (m ³ biogás kg ⁻¹)	Biogás (m ³)
Residuos de cocina	5	0.56	2.8	0.092	0.26
Heces humanas	5	0.13	0.65	0.092	0.06
Estiércol vacuno	1	10	10	0.04	0.40
Estiércol porcino	2	2.8	5.6	0.06	0.336
				subtotal	1.053
Cladodios	0.28	27.47 ^a	7.7	0.3	2.60
		total	26.64		3.62

^a 10 ton ha⁻¹ año⁻¹ (364 días).

suficiente materia prima y conseguir esta cantidad, debe considerarse que es necesario un máximo de 3 kg de nopal para producir 1 m³ de biogás. El digester por lo tanto debe ser alimentado con 7.1 kg día⁻¹, los cuales pueden ser obtenidos en un área de 0.28 ha, asumiendo una disponibilidad de 10 ton cladodios ha⁻¹ año⁻¹, equivalente a 27.47 kg ha⁻¹ día⁻¹.

Sobre la base de la producción de biogás antes descritas, se obtienen 0.45 m³ de gas por m³ de digester; por lo tanto, el tamaño mínimo de este sería de 8 m³. Asimismo, la carga mínima diaria es de 26.24 kg, combinada con agua suficiente para una concentración sólida del 7%, equivalente a 221 litros o también equivalente al volumen del digester, dividido entre 35 días, (i.e. el tiempo requerido para la degradación de la materia orgánica). Cuando se carga el digester con 221 litros, se produce la misma cantidad de biofertilizantes, el cual puede ser usado en el riego, fertilización y adición de materia orgánica simultáneamente (5.20 g N kg⁻¹, 3.90 g P⁻¹, 3.60 g K y 561 g Mo kg⁻¹ MS).

DISEÑO Y OPERACIÓN DE BIODIGESTORES

Los biodigestores deben de tener ciertas características;

- Herméticos - para prevenir la salida de gases indeseables y la entrada de aire.
- Térmicamente aislados - para evitar cambios grandes de temperatura.
- Equipados con válvula de seguridad.

De fácil acceso - para cargar y descargar el sistema con materia prima, la remoción de los sedimentos del digester y el mantenimiento del digester (Varnero *et al.*, 1991, 2001).

Existe abundante información sobre el diseño y operación de biodigestores en varios países, inclu-

yendo India, China y Alemania (García de Cortázar y Varnero, 1995). Mientras que la mayoría de la producción es obtenida de digestores familiares (**Figura 1**), los biodigestores comunitarios son factibles en algunas situaciones, en particular cuando existen grandes cantidades de materiales y la experiencia tecnológica.

Existen dos tipos de digestores; de carga única y de carga discontinua.

- **Carga continua.** La carga de material es frecuente (diaria o semanal), cada carga reemplaza aproximadamente el 5-15% del volumen total. La concentración de sólidos es baja (6-8% de el volumen), y una vez que el proceso de digestión comienza, la tasa de producción de gas es relativamente constante (esto es dependiente de la temperatura). Los digestores continuos son adecuados a aquellos sitios donde hay una producción continua de los materiales para la biodigestión, i.e. si hay posibilidad de coleccionar cladodios todo el año. También son adecuados para pequeñas propiedades donde los desechos familiares pueden ser agregados como materia prima -por ejemplo incorporando las heces producidas por animales domésticos a través de una conexión entre los sanitarios y el digester (Varnero y García de Cortázar, 2006, FAO, 2011). Hay tres modelos disponibles:

- tipo Taiwán, hecho de mangas de plástico (polietileno), (**Figura 4a**).
- Tipo Hindú (**Figura 3a**) - el gasómetro está incluido en el digester en la forma de una campana flotante.
- tipo Chino (**Figura 3b**) - cerrado, con acumulación de gas en la parte superior similar al de la India.

- **Carga total.** Los digestores discontinuos (**Figura 3c**) incluyen una batería de tanques sellada de tanques o depósitos, mientras que la salida del gas está conectada a una válvula flotante, donde se almacena el gas. Con los

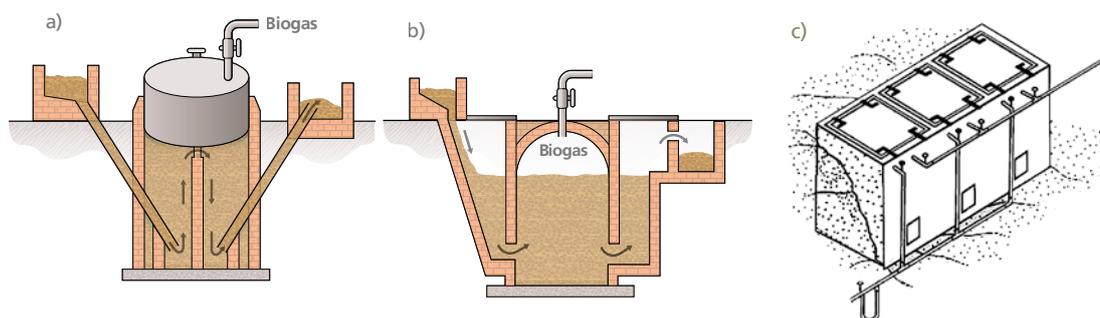


Figura 3
a) digester hindú,
b) digester Chino,
c) digester de carga total

digestores múltiples, uno está cargándose o descargándose siempre mientras los otros están en la producción de biogás. La carga o descarga del digester con la materia prima, la cual tiene una concentración de sólidos más alta (40-60%), es realizada solo una vez, dado que no hay recarga durante el proceso de fermentación. El material orgánico estabilizado es descargado una vez que la producción de biogás se completa. La producción de biogás tiene un periodo inicial de espera, durante el cual la tiene lugar la hidrólisis fermentativa, la formación de ácidos orgánicos y la formación de metano. La mayor parte de la producción de biogás ocurre entonces, antes de hacerse más lenta hasta descender eventualmente hasta casi cero, conforme los materiales cargados se acaban. El sistema discontinuo es adecuado a ciertas situaciones, por ejemplo; cuando los materiales son difíciles de digerir en sistemas continuos, materiales que son difíciles de digerir por fermentación metanogénica; o materiales que están disponibles de manera intermitente. En el caso de cladodios los materiales están disponibles una o dos veces al año (Varnero and García de Cortázar, 2006; FAO, 2011).

Bajo condiciones óptimas y para un mismo volumen de materia seca, los dos tipos de digestores producen la misma cantidad de biogás. Por lo tanto la selección debe basarse en la frecuencia de la

producción de desechos (en este caso cladodios) y la disponibilidad de agua.

Para productores pequeños y medianos, existe un amplio rango de materiales para construir el digester de biogás. Los tipos más económicos son hechos de un tubo de polietileno de bajo costo (EPDM, PVC, HDPE) como se muestra en la **Figura 4a**. Este es conocido como el tipo Taiwán, y está muy distribuido en países de Asia y de Latinoamérica. El costo de los materiales para este tipo son US\$ 7 m⁻³. Los modelos Hindú y Chino pueden ser hechos con diferentes materiales (**Figuras 4b-f**).

ASPECTOS ECONOMICOS

El costo inicial de la producción de biogás en viviendas rurales es de alrededor de US \$50 por biodigester (Buk Xuan An *et al.*, 1999). El costo es recuperado en 9 a 18 meses a través del ahorro de costos de combustible. En áreas rurales donde el principal combustible es la madera, el uso de biogás reduce el daño al ecosistema (menos deforestación) contaminación) y conduce a ahorros de tiempo de hasta 5 horas por día por familia -tiempo que podría ser usado en otras tareas más productivas (Rutamu, 1999). Para calcular la economía del uso del biogás, se asume que una libra (0.45 kg es equivalentes a 1 m³ de biogás, por lo tanto el cálculo teórico

Figura 4

Diferentes materiales usados para la construcción de biodigestores:
 a) tubos de plástico;
 b) ladrillos; c) concreto;
 d) tambores de plástico reciclados;
 e) tambores metálicos reciclados;
 f) prefabricados.



**Figura 5**

a) digestado sólido;
b) biofertilizante (biol
o líquido del digestado).

de $3.61 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ correspondería a 3.61 libras (1.63 kg) de gas por día, con un valor aproximado de US \$2.98 día⁻¹, o US \$ 1.078 año⁻¹.

El residuo obtenido del proceso de digestión (**Figura 5b**) tiene un alto contenido de nutrientes, es por lo tanto un valioso fertilizante que permite ahorrar en los gastos de fertilizante comercial. De acuerdo con Varnero (1991) 1 ton de biofertilizante es equivalente a 40 kg de urea, 50 kg de nitrato de potasio y 94 kg de superfosfato triple. Los precios internacionales de los fertilizantes varían de 255 a US\$ 380 ton⁻¹ (Indexmundi, 2015). Asumiendo un precio promedio de US\$ 0.32 kg⁻¹ de fertilizante, cada tonelada de biofertilizante ahorra US\$ 59.8 de gastos en estos insumos; este ahorro es adicional a la contribución en términos de microorganismos y material orgánico, que serán obtenidos una vez que se vació el biodigestor (**Figura 5a**).

OTROS USOS BIOENERGETICOS

Los cladodios de nopal tienen otros usos bioenergéticos, tales como el biodiesel o la producción de etanol. Con una producción anual de 40 ton ha⁻¹ en cultivos específicos para uso energético o 10 ton ha⁻¹ de residuos de poda proveniente de las plantaciones para tuna la energía puede ser obtenida a través de combustión directa. Los cladodios son cosechados, secados al sol y triturados, y usados en la combustión directa o cogeneración en mezcla con carbón, su poder calorífico es de 3 850-4 200 kcal kg⁻¹.

La tecnología para la producción de etanol es más compleja que la de biogás, por lo tanto, mejor adaptada a mayor escala, dado el alto costo de inversión, y produce etanol a a concentración mayor >98%. En la fermentación se requiere levadura específica para maximizar la producción de alcohol. La concentración de etanol de fermentación varía del 8 al 12% (García de Cortázar y Varnero, 1995), obtenible únicamente por destilación para conseguir la concentración requerida del etanol para combustible.

Las estimaciones indican que el mucilago del nopal puede ser usado para producir cantidades pequeñas de etanol, aproximadamente 20 ml kg⁻¹ de mucilago. Por otro lado, se producen 8.6 litros de 100 kg de cladodios secos, y 24.7 litros de 100 kg de frutos secos, por lo que no es considerado competitivo comparada con la producción de frutos fermentados. A una densidad de 635-5 000 plantas ha⁻¹, si se usan únicamente los cladodios (Retamal *et al.*, 1987), en promedio se pueden obtener 300-3000 litros de etanol de plantaciones sin riego y con riego, respectivamente.



Mercado, estrategias y limitaciones de comunicación

Marcos Mora

Departamento de Economía Agraria, Facultad de Agronomía
Universidad de Chile



INTRODUCCION

El objetivo de este capítulo es analizar las estrategias de agronegocios aplicadas a la tuna y sus productos derivados y examinar los aspectos de negocios que afectan su desarrollo. Los registros revisados incluyen varias fuentes, principalmente mexicanas, italianas y chilenas. Sin embargo, debe anotarse que la información del producto es escasa y anticuada, como lo señalo Inglesse *et al.*, (2002a). consecuentemente, el estudio se enfocó en Chile, y el análisis es suplementado y discutido con literatura asociada con los mayores países productores, México e Italia.

De acuerdo a la Fundación para la Innovación Agraria (FIA, 2010), muchos países alrededor del mundo producen tuna, pero México es el productor más importante (actualmente cuenta aproximadamente con 70 000 ha). Otros países productores importantes son: Italia, Sudáfrica, Argentina, Chile, Bolivia, Perú, Colombia, Estados Unidos de América, Marruecos, Algeria, Libia, Túnez, Egipto, Jordania, Pakistán, Israel, Grecia, España y Portugal. Sin embargo, en un número significativo de estos países, especialmente de África, las tunas son consideradas como subproducto de las plantas usadas principalmente para la conservación de suelos degradados. Existe potencial para el desarrollo del nopal tunero a través de un amplio rango de aplicaciones, que incluyen:

- Cultivo como suplemento forrajero, del cual Brasil es el principal productor (Callejas *et al.*, 2009);
- Consumo como hortalizas (cladodios) y fruta fresca;
- Usos medicinales;
- Industrialización hacia productor procesados (e.g. harina de cladodios, mermeladas y jugos);
- Industrialización no alimentaria (e.g. bioenergéticos y cosméticos) y
- Producción de carmín.

El nopal juega también un papel importante en la agricultura de subsistencia en muchas áreas del mundo. Así sea cultivada en pequeñas plantaciones o provenga de nopaleras naturales, los nopales son una fuente crucial de alimento (frutas y sus derivados) para la población rural pobre, así como de forraje o pastura para su ganado. Este es el caso no únicamente de África del Norte y del Este (Eritrea y Etiopia), sino también de México, el Cercano Oriente y América. Mien-

tras que no es posible dar una dimensión económica a este fenómeno, en el Norte de Tigray (Etiopia) se le da mucha importancia al nopal, especialmente las nopaleras naturalizadas, que significan la subsistencia de la población durante los meses o años de escasez de alimentos.

En la mayoría de los países productores, el nopal se ha desarrollado en zonas semiáridas y áridas (Inglesse *et al.*, 1995b; Russell y Felker, 1987b). Es un producto marginal en el mercado de frutas, pero en México representa empleo e ingreso en zonas donde otros cultivos no pueden ser producidos (Timpanaro *et al.*, 1987b). el cultivo del nopal se localiza frecuentemente en áreas de alta "ruralidad", es plantado por pequeños productores y agricultores con poca tierra, esto lo hace atractivo desde un punto de vista estratégico y debe ser considerado seriamente en las políticas públicas de acciones de desarrollo.

Adicionalmente, en relación a las ventas y mercadeo, la fruta fresca es vendida principalmente en los mercados domésticos de frutas frescas con mínima incursión en los mercados de exportación. Italia por ejemplo, es el segundo productor a nivel global y es líder en exportación de tunas. En la isla de Sicilia se llevan a cabo numerosos festivales alrededor de la época de cosecha (Octubre-Noviembre) en las poblaciones de San Cono, Biancavilla, S. Margherita Belice y Roccapalumba (Sáenz *et al.*, eds, 2006).

PRODUCCION Y ANTECEDENTES DEL MERCADO

México es el mayor productor de tuna, obteniendo aproximadamente el 80% de la producción mundial estimada en 500 000 ton. Italia con el 12.2% es el segundo productor, y Sudáfrica con el 3.7% ocupa el tercer lugar. Estos tres países en conjunto aportan el 96% de la producción mundial de tuna. El rendimiento promedio varía enormemente; desde 6.5 t ha⁻¹ (García *et al.*, 2003) en México hasta 20 ton ha⁻¹ en Italia y 25 ton ha⁻¹ en Estados Unidos de América e Israel. En Chile el nopal es tradicionalmente cultivado entre las regiones de Arica, Parinacota y Bio Bio; recientemente se ha sido introducido entre Atacama y Maule, principalmente para cubrir la demanda del consumo doméstico. Existe una fuerte concentración del cultivo en la zona central de Chile. El área cubierta



con nopal en Chile ha declinado hasta 800 ha y de acuerdo con la Oficina de Estudios y Políticas Agrícolas (ODEPA, 2015 a) y Franck (2010), está concentrado en las regiones cercanas a las grandes ciudades, tales como Santiago, Viña del Mar y Valparaíso (**Tabla 1**), en Atacama y Maule. Sicilia cuenta con más del 96% del total de la tuna plantada, con 8 300 ha que producen 87 000 ton anualmente (Timpanaro, *et al.*, 2015b).

La adición de valor y la creación de derivados para propósitos comerciales es mínima, sin embargo se ha realizado investigación importante en el desarrollo de productos agroindustriales de tuna (Saenz *et al.*, eds. 2006). Por otro lado, una dinámica muy diferente se presenta en Italia donde se ha incrementado el cultivo en los últimos 20 años. Aun así el desarrollo es limitado por varias razones, incluyendo la oferta limitada, la falta de coordinación a través de toda la cadena de suministro y la escasez de recursos para aumentar la investigación, la innovación y las técnicas de cultivo (Timpanaro, *et al.*, 2015b). El rendimiento promedio de una plantación de tuna en Chile es de alrededor de 10 ton ha⁻¹. Sin embargo, con técnicas modernas de cultivo podría obtenerse más del doble.

La variedad más popular de tuna es la selección local con pulpa verde-amarillenta (CEZA, 2011). Existen también otros genotipos con frutas de color morado, anaranjado, amarillo, rojo y blanco (Saenz y Sepúlveda, 2011). El mercado de la tuna esta atomizado a nivel de productor y a nivel de venta al por mayor es un mercado oligopsonico/oligopolístico; esto genera asimetrías de información entre productores y compradores e incrementa el poder de mercado de los compradores, limitando el desarrollo de los productores en Chile. Consecuentemente, los productores esperan por los mismos compradores cada año, quienes traen sus propios trabajadores para la cosecha. En muchos casos, estos productores no pueden vender directamente o establecer contactos de negocios con otros compradores. Hace una década, existía la misma situación en Italia (Inglese *et al.*, 2002a); la mayor parte de la cosecha era vendida por el productor en el campo, con participación limitada del productor en la cadena de valor. Actualmente, las organizaciones de productores son más sofisticadas, los productores obtienen mayor ingreso y tienen mayor impacto en el mercado. Uno de los ejemplos más eficientes es el de Euroagrumi S.C.C. un consorcio operando en Sicilia que comercializa 1 500 ton año⁻¹ de tuna con un valor de € 2.5 millones.

La producción de fruta en el hemisferio norte se obtiene de fines de julio a noviembre, con una pequeña producción de invierno en Israel en enero-marzo, la

mayor parte destinada al mercado doméstico. Italia concentra su producción en octubre-noviembre, con el 60% destinada Sicilia, 15-20% se exporta dentro de Europa y una pequeña fracción se exporta a Canadá (Timpanaro *et al.*, 2015b). África del Norte no alcanza los mercados de Europa del inicio del verano (Junio-Julio), cuando no hay fruta disponible en Italia por las altas temperaturas que afectan el manejo postcosecha y la exportación. México produce tuna de junio a octubre, con una exportación modesta a Estados Unidos de América y Canadá. En el hemisferio sur, Argentina y Sudáfrica producen de Enero a Marzo pero únicamente para los mercados domésticos. Rara vez adoptan la técnica italiana de la *scozzolata* (remoción del primer flujo de flores y cladodios) para obtener una segunda cosecha fuera de temporada. Por otro lado Chile, produce dos cosechas sin ayuda técnica, la segunda en Junio-septiembre. En general, la tuna arriba al mercado de manera estacional; sin embargo, mejorando la coordinación entre países productores y perfeccionando el manejo postcosecha, la fruta podría ser ofrecida a los mercados casi en cualquier época del año, como en el caso del kiwi.

En Chile, el principal mercado para la tuna está representado por los mayoristas (Lo Valledor y Mapocho Fair), quienes revenden a los minoristas. De acuerdo con Mora *et al.*, (2013), los mayoristas representan el 60% de las ventas de tuna. Otro canal importante, que mueve el 18% del producto son las tiendas informales y vendedores callejeros en las esquinas y semáforos. Finalmente, los supermercados reciben apenas el 2%. En general, los precios han mostrado una ligera tendencia al incremento. Durante el año los precios se elevan cuando el volumen recibido en los mercados al mayoreo es pequeño y viceversa. También existe una relación directa entre el tamaño de fruto y el precio. Debe de anotarse que durante el invierno (Junio-Septiembre en el hemisferio sur), una pequeña cantidad de tuna llega al mercado a precios superiores al promedio (**Figura 1**).

La **Tabla 2** muestra la unidad de valor por kg de tuna para exportación vía aérea aproximadamente US\$ 1.9 en 2011. Si los costos de exportación (aproximadamente US\$ 0.6 kg⁻¹) son sustraídos (FOB o Free on Board), la unidad de valor esta alrededor de US\$ 1.3 kg⁻¹ en base al tipo de cambio del peso chileno de 685.6 = US\$ 1, observado en septiembre de 2015). Mientras este es un valor atractivo, es difícil de conseguir grandes volúmenes de tuna calidad exportación, dado que esta clase representa solamente una pequeña fracción de la fruta cosechada. En contraste, el mercado doméstico paga el equivalente de US\$ 0.6 kg⁻¹, i.e. menos de la mitad del precio de exportación.



TABLA 1 Numero de productores y área plantada con tuna en Chile

Región /Variedad	Numero	Total (ha)
Región de Atacama		
'Chilena'	2	5.18
Total	2	5.18
Región Coquimbo		
'Blanca'	1	14.09
'Chilena'	7	69.01
No hay información	2	2.57
'Til-Til'	1	3.91
Total	11	89.58
Región Valparaíso		
'Blanca'	3	1.73
'Chilena'	58	65.75
No hay información	6	6.32
'Til-Til'	2	8.72
Total	69	82.52
Región metropolitana		
'Chilena'	22	228.11
'Nopal De Castilla'	4	29.30
Región metropolitana	6	20.60
'Til-Til'	50	306.22
'Undulatta Griffiths'	1	2.84
Total		587.07
Región L. B. O'Higgins		
'Chilena'	1	0.20
No hay información	1	7.00
'Til-Til'	1	18.00
Total	3	25.20
Región Maule		
'Chilena'	1	5.00
'Til-Til'	1	5.00
Total	2	10.00
Total del país		799.55

Fuente: ODEPA-CIREN, 2015a, b, c; ODEPA-CIREN, 2014, 2013.

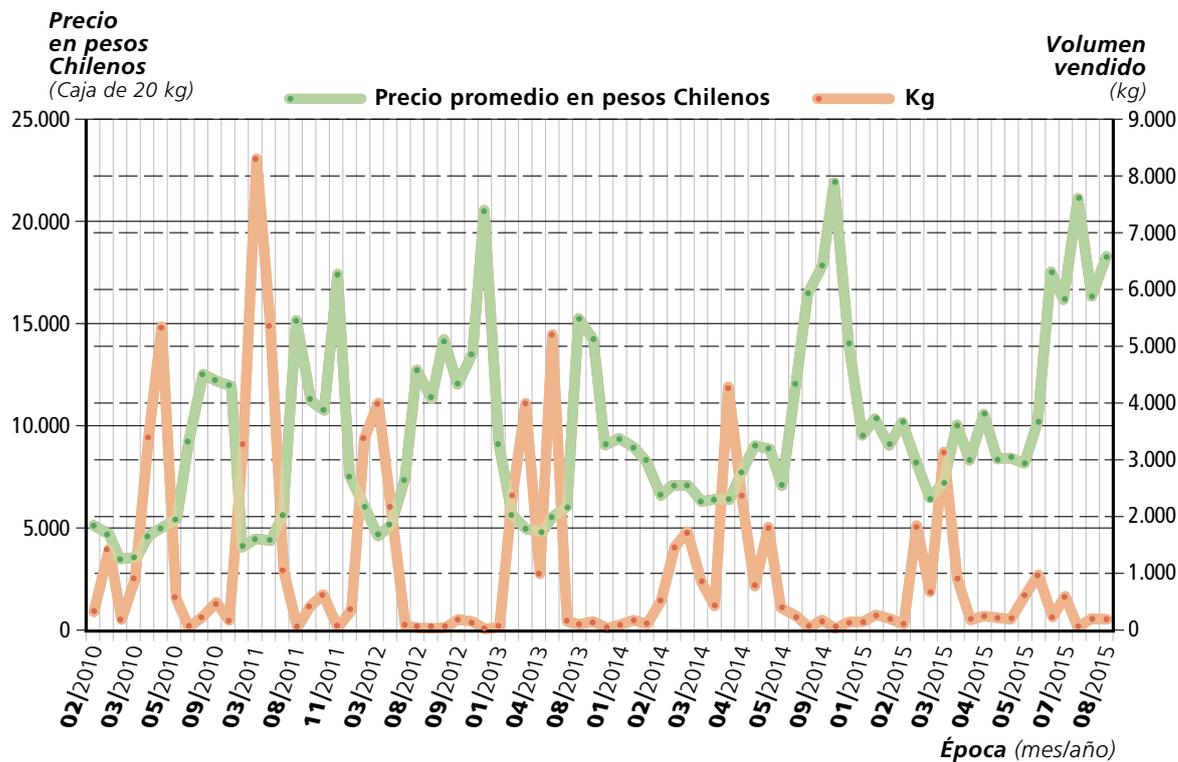


Figura 1
Precio y volumen de tuna de alta calidad en el principal mercado mayorista de Chile (Fuente: ODEPA 2015b).

TABLA 2 Tuna fresca exportada vía aérea desde Chile

Año	FOB	Volumen (kg)	FOB/US\$	Países de exportación y transporte
2002	53 795	23 641	2.3	Canadá, USA
2003	37 829	18 766	2.0	Japón, USA
2004	24 252	12 423	2.0	Arabia Saudita, USA
2005	29 497	17 152	1.7	Canadá, USA
2006	54 626	17 168	3.2	Arabia Saudita, USA
2007	75 963	20 172	3.8	España, USA
2008	42 173	12 138	3.5	España, USA, UK
2009	28 779	11 201	2.6	España, USA
2010	0	0	-	
2011	21 738	11 362	1.9	USA
2012	0	0	-	
2013	0	0	-	
2014	0	0	-	

Fuente: ODEPA (2015b).

PERCEPCION DE LA CALIDAD DE LA TUNA: DE FACTORES INTRINSECOS A EXTRINSECOS

De acuerdo con Olson y Jacoby (1972) los atributos de calidad pueden ser descritos como extrínsecos - relacionados al producto (e.g. precio, color, marca y empaque) - o intrínsecos (ligados a atributos físicos del producto e.g. composición nutricional y sabor). Como lo aseveraron Grunert *et al.*, (1996), la calidad es un fenómeno multidimensional, descrito por una serie de atributos que son subjetivamente percibidos por los consumidores antes (expectativa de calidad) y después (experiencia de calidad) de la compra. Los primeros influyen mayormente las preferencias del consumidor en respuesta a preocupaciones crecientes relacionadas con la seguridad, salud, conveniencia, localidad, factores éticos y ambientales (Migliore *et al.*, 2012, 2015 a; Bernues *et al.*, 2003).

El comercio de las tunas en Chile y los principales países productores se ha enfocado en la fruta fresca, enfocándose esencialmente en sus características intrínsecas. En Chile se han observado los desarrollos de los modos de empaque, etiquetado y marcas comerciales, pero ninguno ha tenido éxito en forma comercial. En Italia existe dos designaciones protegidas cuyas marcas están activas:

- "Ficodindia dell'Etna" que se refiere a la producción obtenida en el área del volcán Etna, donde se cosecha principalmente la variedad de tuna blanca "Trunzara Bianca", debido a su pulpa firme y madurez temprana en verano (Julio-agosto).
- "Ficodindia di San Cono" se refiere al área de cultivo más importante en Italia, donde se producen tres cultivares ("Gialla", "Rossa" y "Bianca").

De acuerdo con la FIA (2010) el potencial agroindustrial de países como México e Italia ha permitido el desarrollo de una gran variedad de alternativas agroindustriales, por ejemplo; harina, tortillas, suplementos, dulces, botanas, productos congelados y jugos. En contraste en Italia este sector está limitado a algunos licores y mermeladas en pequeña escala, mientras que el interés en el comercio de subproductos para usos medicinales y nutraceuticos está experimentando una rápida expansión. Saenz *et al.*, eds. (2006), señalaron que pueden obtenerse un número significativo de productos de las diferentes partes de la planta, aún más si se consideran la explotación de las variedades de frutos de diferentes colores. La fruta puede usarse para preparar un gran número de productos, incluyendo mermeladas, licores y vinagres, salsas, jugos concentrados y productos enlatados. Por otro lado los polvos de cladodios, pueden ser usados como alimento funcional e ingrediente colorante, mientras que los compuestos bioactivos

encapsulados pueden actuar también como agentes colorantes (Saenz *et al.*, 2009). Más específicamente muchos ingredientes funcionales se caracterizan por sus efectos benéficos potenciales en la salud, gracias a su fibra, hidrocoloides (mucilago), pigmentos (betalainas y carotenoides), minerales (calcio y potasio) y vitaminas (e.g. vitamina C), los cuales están presentes en la fruta y los cladodios (Piga, 2004; CEZA, 2011).

La mayoría de los consumidores de tunas frescas se enfocan en sus atributos intrínsecos, debido a que prácticamente no ha habido desarrollo de sus atributos intrínsecos, estos están relacionados con la apariencia física del producto, color, tamaño, textura, forma y apariencia (Mora *et al.*, 2011; Sulé *et al.*, 2002).

Las señales extrínsecas están relacionadas con el producto pero no son parte de su esencia, por ejemplo; la marca, el empaque, sello de calidad, precio, PDO, venta, fuerza de ventas e información sobre su producción. Migliore *et al.*, (2015) reporto que los atributos de credibilidad para el mercado italiano son la sustentabilidad ambiental, la salud y el origen italiano.

ATRIBUTOS DE VALOR Y PREFERENCIAS DEL CONSUMIDOR

En Chile existen 17 variedades del género *Opuntia*, probablemente introducidas desde México por los españoles; la variedad "Verde" (*O. ficus-indica*), es actualmente la más comercial (Sudzuki *et al.*, 1993). En este contexto se desarrolló un estudio de las preferencias de la tuna por nuestro grupo (Matamala *et al.*, 2015) enfocado en el estudio de 6 variedades de diferentes colores, el cual evaluó sus atributos intrínsecos; peso, número de semillas, grosor de cascara, color interno y externo y sabor dulce. De acuerdo con Motoboki *et al.*, (2009), un peso aproximado de 120 g es un atributo positivo para el mercado. El grosor de la cascara y las semillas también tienen impacto comercial (FIA, 2001). Las frutas verdes son preferidas por la población Chilena, mientras que las tunas amarillas son las más consumidas en el mundo y las tunas rojas atraen más a los consumidores de primera vez (Migliore *et al.*, 2015a).

Matamala *et al.*, (2015) identifico tres segmentos de mercado principales: i) tradicional, con consumo regular de tuna; ii) esporádico, de consumo ocasional; iii) escéptico acerca de las características del producto. Por otro lado Esparza (2015) identifico tres segmentos de mercado; i) "practico" (48% de la población encuestada); ii) "esencial" (18.5%) y iii) "saludable" (13.5%). En general el precio fue el atributo más importante, seguido de lugar de origen y finalmente el color de la pulpa. También existe un segmento de mercado potencial atraído por la tuna mínimamente procesada.



Migliore *et al.*, (2015a, b) reportaron hallazgos similares para el mercado italiano. Inglese *et al.*, (1995) indicó que el mayor reto para los investigadores está relacionado con el tamaño reducido del fruto y el alto número de semillas, junto con la escasa promoción y aspectos relacionados a la estandarización de la calidad. Existen además otros atributos emocionales, de humor o ambiente que constituyen las bases motivacionales del proceso de compra. En relación a la tuna, Chirona e Ingrassia (2015) reportaron tres perfiles de consumidor. El primero analiza la tuna no solo en sus elementos cualitativos y sensoriales, sino también su relación con necesidades hedonísticas. La segunda está asociada con la imagen de la fruta en el territorio. La tercera permite al consumidor desarrollar necesidades secundarias, incrementando las posibilidades de rebasar las limitaciones relacionadas con la fruta.

PROPUESTA DE ESTRATEGIA COMERCIAL PARA LA TUNA FRESCA Y SUS PRODUCTOS

Callejas *et al.* (2009) proveen guías para el mejoramiento del producto en términos de aspecto, calidad, valor agregado y precio competitivo.

Precio

Esta variable depende mucho de hacer las cosas del modo correcto; sin embargo, en la cadena de valor competitiva, los precios de la tuna son potencialmente atractivos. El incremento de la competitividad a través del mejoramiento del proceso de calidad (basados en un rendimiento de 12 ton ha⁻¹; o 600 cajas, 20% más de la producción actual de la región central de Chile) podría resultar en un precio promedio de 6 000 pesos Chilenos (US\$ 8.75) por caja de calidad Premium (previendo que sería el precio de mayoreo más bajo esperado). Esto podría generar un ingreso de 3.6 millones de pesos chilenos equivalentes a US\$ 251 ha⁻¹.

La experiencia italiana indica que la fruta de mayor tamaño (clasificada como A o AA) puede alcanzar precios de € 1.5-3.0 en la finca, mientras que los tamaños más pequeños reciben un marcado precio bajo, hasta 30-40% menos para frutas de clase B y por supuesto menos para frutas de clase C. Por lo tanto, solamente con manejo de cultivo eficiente se pueden alcanzar los mejores resultados de mercado, obteniendo la mayor proporción de tunas clase A, desespínadas y sin defectos, cosechadas en la etapa de madurez adecuada y con una óptima proporción de pulpa (55-65%) (Inglese *et al.*, 2002a).

Producto

La calidad como es percibida por los consumidores depende principalmente de factores intrínsecos de la fruta. Ciertos aspectos requieren mejoramiento para alcanzar, por ejemplo, tamaño uniforme, cascara delgada y menos semillas. Para el caso de tunas de Chile, la preferencia es por frutas verdes o amarillas. Las tunas amarillas y rojas son las más apreciadas en el mercado italiano. También existe un mercado creciente para las tunas mínimamente procesadas, particularmente entre el público que accede a la sección de productos refrigerados de los supermercados. Se requiere investigación para explorar el potencial del mercado de otros productos derivados de la tuna; mermeladas, harinas, jugos o concentrados y productos funcionales. Finalmente, para que un producto de calidad sea preferido por los consumidores, se requiere innovación en las actividades primarias de la cadena de valor, es necesario mejorar las técnicas de cultivo, con atención particular a las prácticas orgánicas (Timpanaro *et al.*, 2015b; Migliore *et al.*, 2015a).

Promoción y publicidad

En general la tuna es un producto conocido y consumido por un segmento específico del mercado. La estrategia de comunicación por lo tanto, debe presentar los atributos intrínsecos - ingredientes funcionales con efectos benéficos a la salud, tales como fibra, pigmentos (betalainas y carotenoides), minerales (calcio, potasio) y vitaminas y carotenoides - y hacer que un público más amplio efectivamente las conozca. Las acciones de comunicación asociadas con políticas públicas son esenciales y son recomendadas para la tuna y sus derivados.

CONCLUSIONES

Los productores de tuna alrededor del mundo enfrentan retos similares en relación al mejoramiento de la cadena de valor. Los temas más importantes se anotan enseguida:

- Se requieren sistemas de riego para la producción, dado que el nopal se cultiva en lugares caracterizados por la falta de agua.
- La calidad de la fruta debe mejorarse, con articular atención a los atributos intrínsecos asociados con homogeneidad.
- Las estrategias de mercado son necesarias, debido a que generalmente es un cultivo en pequeña escala, donde escasean los recursos y acceso a tecnologías modernas. Es recomendable que se desarrollen asociaciones para mejorar la organización, optimizar los recursos y enfrentar las asimetrías significativas y las fallas inherentes a los mercados.



- Se requiere más información actualizada de fácil acceso, especialmente la relacionada con mercados, costos, precios y calidad. Los países productores más grandes podrían desarrollar un proyecto conjunto para el desarrollo de una base de datos con información económica, estandarizada, y de actualidad sobre los negocios.
 - El papel social que juega el nopal en sus áreas de producción debe ser reconocido. Las políticas públicas deben de ser implementadas para ayudar a las asociaciones a mejorar los resultados económicos y sociales y generar innovación a través de la cadena de valor, lo mismo en las actividades primarias que en las secundarias. La meta es mejorar el nivel de competitividad y el bienestar de la gente viviendo en esos territorios.
 - La investigación de mercado es requerida para entender el interés potencial en los productos preparados con cladodios y tunas. Muchos de sus atributos serían bien recibidos en los mercados. El aseguramiento de la calidad debe ser instalado en los productos procesados, dado que se reconoce como herramienta esencial para los comerciantes que venden dichos productos.
 - El desarrollo de los **atributos intrínsecos** de la tuna debe ser el centro de cualquier estrategia de mercado:
 - mejorar la productividad y calidad de los sistemas de producción actuales.
 - Llevar a cabo estudios de factibilidad técnica y económica de la producción y el mercado potencial a escala doméstica e internacional.
 - explorar la receptividad del consumidor por nuevos productos desarrollados en los centros de investigación, principalmente agroindustriales, llevándolos a la fase de prototipo y continuando hacia prueba y validación en el mercado.
 - Comunicar los atributos intrínsecos desconocidos por el consumidor para crear valor.
 - explorar nuevos canales de comercialización, tales como tiendas de especialidad, restaurantes y banquetes, compañías farmacéuticas e internet.
- Desarrollar la tuna mínimamente procesada.
- Elaborar y comunicar atributos específicos con etiquetado y sanidad, calidad, y aspectos nutricionales y ambientales.
 - El desarrollo de los **atributos extrínsecos** (empaques y etiquetado) es también esencial para agregar valor.



Bibliografía

- Abdelouahed Kidiss.** 2016. *Coche-nille du cactus: la «handia» marocaine en péril?* (available at <http://fr.le360.ma/economie/coche-nille-du-cactus-la-handia-marocaine-en-peril-81079>).
- Abidi, S., Ben Salem, H., Vasta, V. & Priolo, A.** 2009a. Spineless cactus (*Opuntia ficus indica* f. *inermis*) cladodes in the diet of lambs and kids: Digestion, growth and intramuscular fatty acid composition. *Small Ruminant Res.*, 87: 9–16.
- Abidi, S., Ben Salem, H., Martín García, A.I. & Molina Alcaide, E.** 2009b. Ruminal fermentation of spiny (*Opuntia amy-clae*) and spineless (*Opuntia ficus indica* f. *inermis*) cactus cladodes and diets including cactus. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 149: 333–340.
- Abidi, S., Ben Salem, H., Nefzaoui, A., Vasta, V. & Priolo, A.** 2013. Silage composed of *Opuntia ficus-indica* f. *inermis* cladodes, olive cake and wheat bran as alternative feed for barbarine lamb. *Acta Hortic.*, 995: 297–302.
- Acevedo, E. & Doussoulin, E.** 1984. Productividad de la tuna en el área de Til Til. *Tecnología y Agricultura*, 29(June–July): 18–22.
- Acevedo, E., Badilla, I. & Nobel, P.S.** 1983. Water relations, diurnal acidity changes and productivity of a cultivated cactus, *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiol.*, 72(3): 775–780.
- Agence Ecofin.** 2015. *L'Algérie s'enorgueillit de sa première usine de transformation de figue de barbarie* (available at <http://www.agencecofin.com/fruits/0510-32871-l-algerie-s-enorgueillit-de-sa-premiere-usine-de-transformation-de-figue-de-barbarie>).
- Aguilar Z.A.** 2007. *Nopal verdura*. Memoria del 1er Congreso de Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria y Forestal en el Distrito Federal, 24–25 septiembre 2007. 120 pp.
- Aguilar, B.G. & Chàvez, F.S.** 1995. Frutos partenocarpicos de nopal (*Opuntia amy-clae*) mediante la inducción de esterilidad masculina. In E. Pimienta Barrios, L.C. Nerí, U.A. Muñoz & M.F.M. Huerta, eds. Memoria del VI Congreso Nacional y IV Internacional sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Guadalajara, Mexico, Universidad de Guadalajara, pp. 136–138.
- Aguilar Sánchez, L., Martínez Damián, M.A., Barrientos Priego, A.F., Aguilar Gallegos, N. & Gallegos Vásquez, C.** 2007. Potencial de oscurecimiento enzimático de variedades de nopalito. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 9: 165–184.
- Ahmad, A., Davies, J., Randall, S. & Skinner, G.R.B.** 1996. Antiviral properties of extract of *Opuntia streptacantha*. *Antiviral Res.*, 30: 75–85.
- Ahmed, M.S., El Tanbouly, N.D., Islam, W.T., Sleem, A.A. & El Senousy, A.S.** 2005. Anti-inflammatory flavonoids from *Opuntia dillenii* (Ker-Gawl) Haw. Flowers growing in Egypt. *Phytother. Res.*, 19: 807–809.
- Ait Hamou, A.** 2007. An overview on medicinal and cosmetic uses of cactus in Morocco. *Cactusnet Newsletter*, 11: 51–56.
- Alary, V., Nefzaoui, A., Ben Jemaa, M.** 2007. Promoting the adoption of natural resource management technology in arid and semi arid areas: Modelling the impact of spineless cactus in alley cropping in Central Tunisia. *Agric. Syst.*, 94: 573–585.
- Alfaro, F.** 2014. *Estabilidad de betalainas en yogur adicionado con microparticulas de pulpa o ultrafiltrado de tuna púrpura* (*Opuntia ficus-indica*). Santiago, Faculty of Agronomical Science, University of Chile (Masters thesis).
- Alimi, H., Hfaeidh, N., Mbarki, S., Bouoni, Z., Sakly, M. & Ben Rouma, K.** 2012. Evaluation of *Opuntia ficus-indica* f. *inermis* fruit juice hepatoprotective effect upon ethanol toxicity in rats. *Gen Physiol. Biophys.*, 31: 335–342.
- Alkämper, J.** 1984. Chancen und Risiken im Anbau und in der Nutzung von Opuntien. *Giessener Beitr. Entwicklungsforsch.*, 11: 9–14.
- Allegra, M., Furtmüller, P.G., Jantschko, W., Zederbauer, M., Tesoriere, L., Livrea, M.A. & Obinger, C.** 2005. Mechanism of interaction of betanin and indicaxanthin with human myeloperoxidase and hypochlorous acid. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 332: 837–844.
- Allegra, M., Ianaro, A., Tersigni, M., Panza, E., Tesoriere, L. & Livrea, M.A.** 2014. Indicaxanthin from cactus pear fruit exerts anti-inflammatory effects in carrageenin-induced rat pleurisy. *J. Nutr.*, 144: 185–192.
- Allegra, A., Sortino, G., Miciletta, G., Riotta, M., Fasciana, T. & Inglese, P.** 2015. The influence of harvest period and fruit ripeness at harvest on minimally processed cactus pears (*Opuntia ficus-indica* L. Mill.) stored under passive atmosphere. *Postharvest Biol. Technol.*, 104: 57–62.
- Alzate & Ramírez, J.** 1777. Memoria en que se trata del insecto grana o cochinilla, de su naturaleza y serie de su vida, como también del método para propagarla y reducirla al estado en que forma uno de los ramos más útiles del comercio. *La Naturaleza, Soc. Mex. Hist. Nat.*, 6(1882–1884): 97–151.
- Ammar, M.I., Shltout, A.M. & Kamhaway, M.A.** 2004. Cladode and fruits rots of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L. Mill.) in Egypt. *Egypt. J. Phytopathol.*, 32: 119–128.
- Ammar, I., Ennouri, M., Khemakhem, B., Yangui, T. & Attia, H.** 2012. Variation in chemical composition and biological activities of two species of *Opuntia* flowers at four stages of flowering. *Ind. Crops Prod.*, 37: 34–40.
- Anderson, E.F.** 2001. *The cactus family*. Portland, Oregon, USA, Timber Press. 779 pp.
- Andrade, C.T.** 2008. *Cactus úteis na Bahia*. Pelotas, Brazil, Ed. USEB.
- Andrade, J.L., de la Barrera, E., Reyes García, C., Ricalde, M.F., Vargas Soto, G. & Cervera, J.C.** 2007. El metabolismo ácido de las crasuláceas: diversidad, fisiología ambiental y productividad. *Bol. Soc. Bot. Mex.*, 81: 37–50.
- Andrade, J.L., Cervera, J.C. & Graham, E.A.** 2009. Microenvironments, water relations, and productivity of CAM plants. In E. de la Barrera & W. Smith, eds. *Perspectives in biophysical plant ecophysiology: a tribute to Park S. Nobel*, pp. 95–120. Mexico City, UNAM.
- Anegay, K. & Boutoba, A.** 2010. *Prickly pear cactus in Southern Morocco regions – from historical patrimony to technological future*. Proceedings of the VII International Congress on Cactus Pear and Cochineal, 17–22 October 2010, Agadir, Morocco.
- Anneck, D.P. & Moran, V.C.** 1978. Critical reviews of biological pest control in South Africa. 2. The prickly pear, *Opuntia ficus-indica* (L) Miller. *J. Entomol. Soc. South. Afr.*, 41: 161–188.
- Anon.** 2014. National Environmental Management Biodiversity Act (10/2004): Alien and Invasive Species Regulations. R. 598. Government Gazette No. 37885.
- Aounallah, M.K., Jebari, A. & Nefzaoui, A.** 2005. Characterization of three *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller cultivars grown at Cap Bon (Tunisia) and their reblooming capacity. *Cactusnet Newsletter*, 9: 3–7.
- Aquilar, A.A.** 1997. Efecto del riego y fertilización sobre el adelanto de floación y cosecha de nopal tunero vc. 'Reyna' en el Estado de Mexico. In Proceedings of the Seventh National and Fifth International Congress on Cactus Pear, Monterrey, Mexico, pp. 140–141.
- Aquino, P.G.** 1992. Factores limitantes en el cultivo de la cochinilla (*Dactylopius* spp.) del nopal (*Opuntia* spp.) en el Altiplano Potosino. En Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Memorias del 5to Congreso Nacional y 3º Internacional, Chapingo, Mexico, pp. 75–76.
- Aquino, L.V., Rodríguez, J., Mendez, L.L. & Kenia, F.T.** 2009. Inhibition of the darkening with cactus mucilage (*Opuntia ficus-indica*) during drying of banana Roatán. *Inf. Tecnol.*, 20(4): 15–20.
- Aquino, E., Chavarría, Y., Chàvez, J., Guzmán, R., Silva, E. & Verdalet, I.** 2012. Caracterización físicoquímica de siete variedades de tuna (*Opuntia* spp.) color rojo-violeta y estabilidad del pigmento de las dos variedades con mayor concentración. *Invest. Cienc.*, 55: 3–10.
- Araújo, L.F., Medeiros, A.N., Neto, A.P., Oliveira, L.S.C. & Silva, F.L.H.** 2005. Protein enrichment of cactus pear (*Opuntia ficus indica* Mill.) using *Saccharomyces cerevisiae* in solid-state fermentation. *Braz. Arch. Biol. Technol.*, 48: 161–168.
- Arba, M.** 2009a. *Le cactus opuntia, une espèce fruitière et fourragère pour une agriculture durable au Maroc* (available at http://agrimaroc.net/agdumed2009/Arba_cactus_opuntia_espece_fruitiere_fourragere.pdf).
- Arba, M.** 2009b. Rooting of one year and second year old cladodes of cactus pear. *Acta Hortic.*, 811: 303–307.
- Arba, M. & Benrachid, K.** 2013. Effect of irrigation on the rooting of one-year-old cladodes of cactus pear. *Acta Hortic.*, 995: 139–144.
- Arba, M., Benismail, M.C. & Mimoun, M.** 2002. The Cactus pear (*Opuntia* spp.) in Morocco: Main species and cultivar characterization. *Acta Hortic.*, 581: 103–106.
- Arba, M., Choukallah, R., Falisse, A. & Paul, R.** 2015a. Phenology of flowering and fruiting of cactus pear and effect of NP fertilizing. *Acta Hortic.*, 1067: 31–38.
- Arba, M., Choukallah, R., Sindic, M., Paul, R. & Falisse, A.** 2015b. Effect of NP fertilizing on fruit yield and fruit quality of cactus pear. *Acta Hortic.*, 1067: 39–46.
- Archibald, E.E.A.** 1935. The development of the ovule and seed of jointed cactus (*Opuntia aurantiaca* Lindley). *S. Afr. J. Sci.*, 36: 195–211.
- Arias Jiménez, E.** 2013a. Importancia de la tuna. *Cactusnet Newsletter*, 13: 9–12.
- Arias Jiménez, E.** 2013b. *Preámbulo: Importancia de la tuna* [Cactus pear importance]. Proceedings of the Second Meeting for the Integral Use of Cactus Pear and Other Cacti and First South American Meeting of the FAO-ICARDA CactusNet, 12–19 September 2012, Santiago del Estero, Argentina. 175 pp.
- Askar, A. & El Samahy, S.K.** 1981. Chemical composition of prickly pear fruits. *Dtsch. Lebensm.-Rundsch.*, 77: 279–281.
- Astello García, M.G., Cervantes, I., Nair, V., Santos Díaz, M.d.S., Reyes Agüero, A., Guéraud, F., Negre Salvayre, A., Rossignol, M., Cisneros Zevallos, L. & Barba de la Rosa, A.P.** 2015. Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from *Opuntia* spp. cultivars with different domestication gradient. *J. Food Compos. Anal.*, 43: 119–130.
- Atti, N., Mahouachi, M. & Rouissi, H.** 2006. The effect of spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* f. *inermis*) supplementation on growth, carcass, meat quality and fatty acid composition of male goat kids. *Meat Sci.*, 73: 229–235.

- Ayadi, M.A., Abdelmaksoud, W., Ennouri, M. & Attia, H.** 2009. Cladodes from *Opuntia ficus-indica* as a source of dietary fiber: Effect on dough characteristics and cake making. *Ind. Crops Prod.*, 30: 40–47.
- Azaredo, H.M.C.** 2009. Betalains: properties, sources, applications, and stability – a review. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 44: 2365–2376.
- Azocar, P.** 2001. *Opuntia* use as feed for ruminants in Chile. In C. Mondragón Jacobo & S. Pérez González, eds. *Cactus (Opuntia spp.) as forage*, pp. 57–61. FAO Plant Production and Protection Paper No. 169. Rome, FAO.
- Baca Castillo, G.A.** 1988. Deficiencias nutricionales inducidas en nopal proveniente de cultivo in vitro. En Memórias Reuniao Nacional e International Sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Universidad Autónoma Agraria, Saltilho, pp. 155–163.
- Baccouche, A., Ennouri, M., Felfoul, I. & Attia, H.** 2013. A physical stability study of whey-based prickly pear beverages. *Food Hydrocolloids*, 33: 234–244.
- Bae, J.S. & Huh, M.W.** 2006. The dyeability and antibacterial activity of wool fabric dyed with cochineal. *J. Korean Soc. Dyers and Finishers*, 18: 22–29.
- Baeza, F.** 1995. *Aprovechamiento del desecho del cultivo de cactáceas Opuntia cacti (tunales) para producción de biogás*. Santiago, Faculty of Physical Sciences and Mathematics, University of Chile (Civil Engineering thesis). 132 pp.
- Bai, F., Wu, J., Gong, G. & Guo, L.** 2015. Biomimetic “cactus spine” with hierarchical groove structure for efficient fog collection. *Adv. Sci.*, 2: 1500047.
- Bailey, I.W.** 1961. Comparative anatomy of the leaf-bearing Cactaceae. II. Structure and distribution of sclerenchyma in the phloem of *Pereskia*, *Pereskopsis* and *Quiabentia*. *J. Arnold Arbor.*, 42: 144–156.
- Barbera, G.** 1984. Ricerche sull'irrigazione del ficodindia. *Frutticoltura*, 46: 49–55.
- Barbera, G.** 1994. *Il ruolo del ficodindia nell'agricoltura delle regioni aride e semi-aride*. Proceedings of the Academy of Sciences, Arts and Letters, Palermo, Italy.
- Barbera, G.** 1995. History, economic and agro-ecological importance. In G. Barbera, P. Inglese, & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, p. 1–11. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Barbera, G. & Inglese, P.** 1993. *La coltura del ficodindia*. Bologna, Italy, Edagricole.
- Barbera, G. & Inglese, P.** 2001. *Fico d'india*. L'Epos Società Editrice. 217 pp.
- Barbera, G., Carimi, F. & Inglese, P.** 1988. La coltura del ficodindia e possibili indirizzi produttivi. *Frutticoltura*, 10: 37–43.
- Barbera, G., Carimi, F. & Inglese, P.** 1991. The reflowering of prickly pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, influence of removal time and cladode load on yield and fruit ripening. *Adv. Hortic. Sci.*, 5: 77–80.
- Barbera, G., Carimi, F. & Inglese, P.** 1992a. Past and present role of the Indian-fig prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, Cactaceae) in the agriculture of Sicily. *Econ. Bot.*, 46: 10–22.
- Barbera, G., Carimi, F., Inglese, P. & Panno, M.** 1992b. Physical, morphological and chemical changes during fruit development and ripening in three cultivars of prickly pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. *J. Hortic. Sci.*, 67(3): 307–312.
- Barbera, G., Carimi, F. & Inglese, P.** 1993a. Effects of GA₃ and shading on return bloom of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). *J. South. Afr. Soc. Hortic. Sci.*, 3: 9–10.
- Barbera, G., Carimi, F. & Inglese, P.** 1993b. Influenza dell'epoca di impianto e del tipo di talea sulla radicazione e sullo sviluppo di barbatelle di *O. ficus-indica* Mill. *Frutticoltura*, 10: 67–71.
- Barbera, G., Inglese, P. & La Mantia, T.** 1994. Seed content and fruit characteristics in cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Miller). *Sci. Hortic.*, 58: 161–165.
- Barbera, G., Inglese, P. & Pimienta Barrios, E., eds.** 1995. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Barcikowski, W. & Nobel, P.S.** 1984. Water relations of cacti during the desiccation: distribution of water in tissues. *Bot. Gaz.*, 145: 110–115.
- Barthlott, W., Burstedde, K., Geffert, J.L., Ibsch, P.L., Korotkova, N., Miebach, A., Rafiqpoor, M.D., Stein, A. & Mutke, J.** 2015. Biogeography and biodiversity of cacti. *Schumannia*, 7: 1–205.
- Basile, F.** 1990. *Indagine economica-agraria sulla produzione del ficodindia in Italia*. Catania, Italy, Faculty of Agrarian Studies, University of Catania, Institute of Agrarian Economics and Politics.
- Basile, F. & Foti, V.T.** 1997. Economic features of cactus pear production in Italy. *Acta Hortic.*, 438: 139–150.
- Batista, A.M., Mustafa, F.A., McAllister, T., Wang, Y., Soita, H. & McKinnon, J.J.** 2003a. Effects of variety on chemical composition, *in situ* nutrient disappearance and *in vitro* gas production of spineless cacti. *J. Sci. Food Agric.*, 83: 440–445.
- Batista, A.M.V., Mustafa, A.F., Santos, G.R.A., De Carvalho, F.F.R., Dubeux, J.C.B., Lira, M.A. & Barbosa, S.B.P.** 2003b. Chemical composition and ruminal dry matter and crude protein degradability of spineless cactus. *J. Agron. Crop Sci.*, 189: 123–126.
- Batista, E., Cavalcanti, I., De Brito, C.H. & De Luna, J.** 2009. Velocidade de infestação e dispersão de *Dactylopius opuntiae* Cockerell, 1896 em palma gigante na Paraíba. *Engenharia Ambiental – Espirito Santo do Pinhal*, 6(1): 196–205.
- Bazzano, L.A., He, J., Ogden, L.G., Loria, C.M., Vupputuri, S., Myers, L. & Whelton, P.K.** 2002. Fruit and vegetable intake and risk of cardiovascular disease in US adults: the first national health and nutrition examination survey epidemiologic follow-up study. *Am. J. Clin. Nutr.*, 76: 93–99.
- Beaulieu, J.C. & Gorny, J.R.** 2004. Fresh-cut fruits. In C.K. Gross, C.Y. Wang & M. Saltveit, eds. *The commercial storage of fruits, vegetables, florist and nursery stocks*. USDA Handbook No. 66. Washington, DC (available at <http://www.ba.ars.usda.gov/hb66/fresh-cutFruits.pdf>).
- Beccaro, G.L., Bonvegna, L., Donno, D., Mellano, M.G., Cerutti, A.K., Nieddu, G., Chessa, I. & Bounous, G.** 2015. *Opuntia* spp. biodiversity conservation and utilization on the Cape Verde Islands. *Genet. Resour. Crop Evol.*, 62(1): 21–33.
- Becerril, A.** 1997. *Porcentaje de aceite en semillas de nopal (Opuntia ficus-indica)*. Memorias VII Congreso Nacional y V Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Monterrey, Mexico.
- Behailu, M. & Tegegne, F., eds.** 1997. *Opuntia in Ethiopia: state of knowledge in Opuntia research*. Proceedings of the International Workshop, 23–27 February 1997. Mekelle University, Ethiopia and Wiesbaden Polytechnic, Germany. 246 pp.
- El Behi, A.W., Orlandi, F., Bonofiglio, T., Romano, B., Fornaciari, M., Inglese, P., Sortino, G. & Liguori, G.** 2015. Pollen morphology and reproductive performances in *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. *Acta Hortic.*, 1067: 558–562.
- Beinart, W.** 2003. *The rise of conservation in South Africa. Settlers, livestock and the environment 1770–1950*. UK, Oxford University Press.
- Beinart, W. & Wotshela, L.** 2011. *Prickly pear. The social history of a plant in the Eastern Cape*. Wits University Press.
- Bekir, E.A.** 2006. Cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.) in Turkey: Growing regions and pomological traits of cactus pear fruits. *Acta Hortic.*, 728: 51–54.
- Belay, T.** 2015. Carmine cochineal: fortune wasted in northern Ethiopia. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 17: 61–80.
- Belgacem, M.** 2012. *Algeria: Valorization du fruit de figuier de Barbarie* (available at <http://dzagro.net/forums/viewtopic.php?f=97&t=2396>).
- El Beltagy, A.** 1999. Can desertification trends be reversed in west Asia and North Africa? In *New technologies to combat desertification*, pp. 65–78. Tehran, Ministry of Agriculture.
- Bendhifi, M., Baraket, G., Zourgui, L., Souid, S. & Salhi Hannachi, A.** 2013. Assessment of genetic diversity of Tunisian Barbary fig (*Opuntia ficus indica*) cultivars by RAPD markers and morphological traits. *Sci. Hortic.*, 158: 1–7.
- Ben Salem, H. & Abidi, S.** 2009. Recent advances on the potential use of *Opuntia* spp. in livestock feeding. *Acta Hortic.*, 811: 317–326.
- Ben Salem, H., Nefzaoui, A., Abdouli, H. & Ørskov, E.R.** 1996. Effect of increasing level of spineless cactus (*Opuntia ficus indica* var. *inermis*) on intake and digestion by sheep fed straw-based diets. *Anim. Sci.*, 62: 293–299.
- Ben Salem, H., Nefzaoui, A. & Ben Salem, L.** 2002a. Supplementation of *Acacia cyanophylla* Lindl. foliage-based diets with barley or shrubs from arid areas (*Opuntia ficus indica* var. *inermis* and *Atriplex nummularia* L.) on growth and digestibility in lambs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 96: 15–30.
- Ben Salem, H., Nefzaoui, A. & Ben Salem, L.** 2002b. Supplementing spineless cactus (*Opuntia ficus indica* f. *inermis*) based diets with urea-treated straw or oldman saltbush (*Atriplex nummularia* L.). Effects on intake, digestion and growth. *J. Agric. Sci. (Cambridge)*, 138: 85–92.
- Ben Salem, H., Ben Salem, I., Nefzaoui, A. & Ben Said, M.S.** 2003. Effect of PEG and olive cake feed blocks supply on feed intake, digestion, and health of goats given kermes oak (*Quercus coccifera* L.) foliage. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 110: 45–49.
- Ben Salem, H., Nefzaoui, A. & Ben Salem, L.** 2004. Spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* f. *inermis*) and oldman saltbush (*Atriplex nummularia* L.) as alternative supplements for growing Barbarine lambs given straw-based diets. *Small Ruminant Res.*, 51: 65–73.
- Benson, L.** 1982. *The cacti of the United States and Canada*. Stanford, California, USA, Stanford University Press.
- Benson, L. & Walkington, D.L.** 1965. The southern California prickly pears – invasion, adulteration and trial by fire. *Ann. Mo. Bot. Gard.*, 52: 262–273.

- Berdan, F.R. & Anwalt, P.R.** 1992. *The Codex Mendoza*. Berkeley, California, USA, University of California Press.
- Bergaoui, A., Boughalleb, N., Ben Jannet, H., Harzallah Shiric, F., El Mahjoub, M. & Mighri, Z.** 2007. Chemical composition and antifungal activity of volatiles from three *Opuntia* species growing in Tunisia. *Pakistan J. Biol. Sci.*, 10: 2485–2489.
- Berger, A.** 1905. *Opuntia ficus-indica* Mill. *Monatsschr. Kakteenk.*, 15: 153–154.
- Berger, A.** 1912a. *Kakteen*. Stuttgart, Eugen Ulmer.
- Berger, A.** 1912b. *Hortus Mortolensis*. London, West Newman & Co.
- Bernués, A., Olaizola, A. & Corcoran, K.** 2003. Extrinsic attributes of red meat as indicators of quality in Europe: an application for market segmentation. *Food Qual. Prefer.*, 14(4): 265–276.
- Berraouan, A., Abderrahim, Z., Hassane, M., Abdelkhaleq, L., Mohammed, A. & Mohamed, B.** 2015. Evaluation of protective effect of cactus pear seed oil (*Opuntia ficus-indica* L. Mill.) against alloxan-induced diabetes in mice. *Asian Pac. J. Trop. Med.*, 530–535.
- Berry, W.L. & Nobel, P.S.** 1985. Influence of soil and mineral stresses on cacti. *J. Plant Nutr.*, 8: 679–696.
- Bertaccini, A., Calari, A. & Felker, P.** 2007. Developing a method for phytoplasma identification in cactus pear samples from California. *Bull. Insectol.*, 60: 257–258.
- Billett, R.** 1987. Prickly profit makers. *Farmers Weekly*, Mar: 31–33.
- Black, C.C. & Osmond, C.B.** 2003. Crassulacean acid metabolism photosynthesis: working the night shift. *Photosynth Res.*, 76: 329–341.
- Blanco Macías, F., Lara Herrera, A., Valdez Cepeda, R.D., Cortés Bañuelos, J.O., Luna Flores, M. & Salas Luevano, M.A.** 2006. Interacciones nutrimentales y normas de la técnica de nutrición compuesto en nopal (*Opuntia ficus-indica* L. Miller). *Rev. Chapingo Ser. Hortic.*, 12(2): 165–175.
- Blanco Macías, F., Magallanes Quintanar, R., Valdez Cepeda1, R.D., Vázquez Alvarado, R., Olivares Sáenz, E., Gutiérrez Ornelas, E., Vidales Contreras, J.A. & Murillo Amador, B.** 2010. Nutritional reference values for *Opuntia ficus-indica* determined by means of the boundary-line approach. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 173: 927–934.
- BOE (Boletín Oficial del Estado).** 2001. *Normas de higiene para la elaboración, distribución y comercio de comidas preparadas*. Real Decreto 3484/2000, pp. 1435–1441. Madrid.
- Boke, N.H.** 1944. Histogenesis of the leaf and areole in *Opuntia cylindrica*. *Am. J. Bot.*, 31: 299–316.
- Boke, N.H.** 1980. Developmental morphology and anatomy in Cactaceae. *BioScience*, 30: 605–610.
- Borland, A.M. & Dodd, A.N.** 2002. Carbohydrate partitioning in CAM plants: reconciling potential conflicts of interest. *Funct. Plant Biol.*, 29: 707–716.
- Borrego Escalante, F., Murillo Soto, M.M. & Parga Torres, V.M.** 1990. *Potencial de producción en el norte de México de variedades de nopal* (*Opuntia* spp.). Proceedings of the First Annual Texas Prickly Pear Council, 21 July 1990, Caesar Kleberg Wildlife Research Institute, Kingsville, Texas, USA. 95 pp.
- Boujghagh, M. & Bouharrou, R.** 2015. Influence of the timing of flowers and young cladodes removal on reflowering and harvest periods, yields and fruit quality of prickly pear (*Opuntia ficus-indica*). *Acta Hortic.*, 1067: 79–82.
- Boyle, T.H. & Anderson, E.F.** 2002. Biodiversity and Conservation. In P. Nobel, ed. *Cacti: Biology and uses*, pp. 125–141. Berkeley, CA, USA, University of California Press.
- Brahmi, D., Bouaziz, C., Ayed, Y., Ben Mansour, H., Zourgui, L. & Bacha, H.** 2011. Chemopreventive effect of cactus *Opuntia ficus-indica* on oxidative stress and genotoxicity of aflatoxin B1. *Nutr. Metab.*, 8: 73–89.
- Brailovsky, H., Barrera, E., Mayorga, C. & Ortega Leon, G.** 1994. Estadios ninfales de los coreidos del Valle de Tehuacan, Puebla (Hemiptera: Heteroptera) I. Chelinidea staffilesi, C. tabulata y Narnia femorata. *An. Inst. Biol., Univ. Nac. Auton. Mex., Ser. Zool.*, 65(2): 241–264.
- Bravo Hollis, H.** 1978. *Las cactáceas de México*. Vol. 1. Mexico City, National Autonomous University of Mexico. 743 pp.
- Bravo Hollis, H. & Sánchez Mejorada, H.** 1991. *Las cactáceas de México*. Vol. 3. Mexico D.F., National Autonomous University of Mexico.
- Bravo Hollis, H. & Scheinvar, L.** 1995. *El interesante mundo de las cactáceas*. Mexico, National Council of Science and Technology.
- Breedt, H.J.** 1996. *Principles of sub-tropical crop, cultivar and rootstock recommendations. Short course in sub-tropical fruit production*. Nelspruit, Mpumalanga, South Africa, ARC Institute for Tropical and Sub-tropical Crops. 19 pp.
- Brickell, C.D., Alexander, C., David, J.C., Hatterscheid, W.L.A., Leslie, A.C., Malecot, V., Jin, X. & Cubey, J.J., eds.** 2009. International code of nomenclature for cultivated plants. Ed. 8. *Scr. Hortic.* 10: 1–184.
- Britton, N.L. & Rose, N.** 1919. *The Cactaceae*. Vol. 1. Washington, DC, Smithsonian Institution.
- Brutsch, M.O.** 1979. The prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) as a potential fruit crop for the drier regions of the Ciskei. *Crop Prod.*, 8: 131–137.
- Brutsch, M.O.** 1992. Crop manipulation in spineless prickly pear *Opuntia ficus-indica* in South Africa. In Proceedings of the Second International Conference on Prickly Pear and Cichineal, 22–25 September, Santiago, pp. 40–47.
- Brutsch, M.O.** 1997a. An overview of the South African cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) industry. Paper presented at the Workshop on *Opuntia* in Ethiopia. University of Mekelle, Tigray, Ethiopia, 23–27 February 1997.
- Brutsch, M.O.** 1997b. Climatic data of selected cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) growing areas in South Africa. *Acta Hortic.*, 438: 13–20.
- Brutsch, M.O. & Scott, M.B.** 1991. Extending the fruiting season of spineless prickly pear (*Opuntia ficus-indica*). *J. South. Afr. Soc. Hortic. Sci.*, 1(2): 73–76.
- Brutsch, M.O. & Zimmermann, H.G.** 1993. The prickly pear (*Opuntia ficus-indica*, Cactaceae) in South Africa: Utilization of the naturalized weed, and of the cultivated plants. *Econ. Bot.*, 47(2): 154–156.
- Brutsch, M.O. & Zimmermann, H.G.** 1995. Control and utilization of wild opuntias. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 155–166. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Budinsky, A., Wolfram, R., Oguogho, A., Elthimiou, Y., Stamatopoulos, Y. & Sinsinger, H.** 2001. Regular ingestion of *Opuntia robusta* lowers oxidation injury. *PLEFA*, 55: 45–50.
- Bui Xuan An, Preston, T.R. & Dolberg, F.** 1997. The introduction of low-cost polyethylene tube biogasifiers on small scale farms in Vietnam. *Livest. Res. Rural Dev.*, 9(2) (available at <http://www.lrrd.org/lrrd9/2/an92.htm>). Accessed 7 November 2015.
- Bunch, R.** 1996. Cactus pear products at D'Arigo Bros. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 1: 100–102.
- Butera, D., Tesoriere, L., Di Gaudio, F., Bongiorno, A., Allegra, M., Pintaudi, A.M., Kohen, R. & Livrea, M.A.** 2002. Antioxidant activities of Sicilian prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit extracts and reducing properties of its betalains: betanin and indicaxanthin. *J. Agric. Food Chem.*, 50: 6895–6901.
- Buxbaum, F.** 1950. *Morphology of cacti*. Pasadena, CA, USA, Abbey Garden Press.
- Buxbaum, F.** 1955. The phylogenetic division of the subfamily ceroideae, cactaceae. *Madrone*, 14(6): 177–206.
- Bwititi, P., Musabayane, C.T. & Nhachi, C.F.B.** 2000. Effects of *Opuntia megacantha* on blood glucose and kidney function in streptozotocin diabetic rats. *J. Ethnopharmacol.*, 69: 247–252.
- Cacciola, S.O. & Magnano di San Lio, G.** 1988. Foot rot of prickly pear cactus caused by *Phytophthora nicotianae*. *Plant Dis.*, 72: 793–796.
- Cai, W., Gu, X. & Tang, J.** 2008. Extraction, purification, and characterization of the polysaccharides from *Opuntia milpa alta*. *Carbohydr. Polym.*, 71(3): 403–410.
- Calderón Paniagua, N., Luna, E., Adolfo, A. & Martínez Hernández, J. de J.** 1997. Efecto de la salinidad en el crecimiento y absorción nutrimental de plantas micropropagadas de nopal (*Opuntia* spp.). En Memorias Congreso Nacional e Internacional Sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Mexico, pp. 165–166.
- Callejas, N., Mathus, J. García, A. Martínez, M. & Salas, J.** 2009. Situación actual y perspectiva de mercado para la tuna, el nopalito y derivados en el Estado de México. *Agrociencia*, 43: 73–82.
- Callen, E.O.** 1965. Food habits of some pre-Columbian Mexican Indians. *Econ. Bot.*, 19: 335–343.
- Cañamares, M.V., García Ramos, J.V., Domingo, C. & Sanchez Cortes, S.** 2006. Surface-enhanced Raman scattering study of the anthraquinone red pigment carminic acid. *Vib. Spectrosc.*, 40: 161–167.
- Cantwell, M.** 1995. Post-harvest management of fruits and vegetable stems. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 120–141. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Cantwell, M., Rodríguez Feliz, A. & Robles Contreras, F.** 1992. Postharvest physiology of prickly pear cactus stems. *Sci. Hortic.*, 50: 1–9.

- Caplan, K.** 1990. Marketing strategies for cactus pear and cactus pear leaves for 1990's. In P. Felker, ed. Proceedings of the First Annual Texas Prickly Pear Council, Texas A&M University, Kingsville, Texas, USA.
- Cardador Martínez, A., Jiménez Martínez, C. & Sandoval, G.** 2011. Revalorization of cactus pear (*Opuntia* spp.) wastes as a source of antioxidants. *Cienc. Tecnol. Aliment. (Campinas, Braz.)*, 31(3): 782–788.
- Carpio, M.D.A.** 1952. Nota sobre la cariólogía de dos especies de *Opuntia*. *Genét. Ibér.*, 4: 47–62.
- Caruso, M., Currò, S., Las Casas, G., La Malfa, S. & Gentile A.** 2010. Microsatellite markers help to assess genetic diversity among *Opuntia ficus-indica* cultivated genotypes and their relation with related species. *Plant Syst. Evol.*, 290: 85–95.
- Casas, A. & Barbera, G.** 2002. Mesoamerican domestication and diffusion. In P.S. Nobel, ed. *Cacti: Biology and uses*, pp. 143–162. Berkeley, CA, USA, University of California Press.
- Casp, A. & Abril, J.** 1999. *Procesos de conservación de alimentos*. Madrid, Mundi-Prensa.
- Cassano, A., Conidi, C., Timpone, R., D'Avella, M. & Drioli, E.** 2007. A membrane-based process for the clarification and concentration of cactus pear juice. *J. Food Eng.*, 8: 914–921.
- Cassano, A., Conidi, C., Timpone, R., D'Avella, M. & Drioli, E.** 2010. Physico-chemical parameters of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) juice clarified by microfiltration and ultrafiltration processes. *Desalination*, 250: 1101–1104.
- Castellanos Santiago, E. & Yahia, E.M.** 2008. Identification and quantification of betalains from the fruits of 10 Mexican prickly pear cultivars by high-performance liquid chromatography and electrospray ionization mass spectrometry. *J. Agric. Food Chem.*, 56: 5758–5764.
- Castellar, R., Obon, J., Alacid, M. & Fernández López, J.** 2003. Color properties and stability of betacyanins from *Opuntia* fruits. *J. Agric. Food Chem.*, 51: 2772–2776.
- Castellar, M.R., Obon, J.M., Alacid, M. & Fernández López, J.A.** 2008. Fermentation of *Opuntia stricta* (Haw.) fruits for betalains concentration. *J. Agric. Food Chem.*, 56: 4253–4257.
- Caswell, J.** 2000. Analyzing quality and quality assurance (including labeling) for GMOs. *AgBioForum*, 3(4): 225–230
- Cefola, M., Renna, M. & Pace, B.** 2014. Marketability of ready-to-eat cactus pear as affected by temperature and modified atmosphere. *J. Food Sci. Technol.*, 51(1): 25–33.
- CEZA (Agricultural Centre for Arid Zones).** 2011. *Tuna*. University of Chile. 12 pp.
- Chalak, L., Younes, J., Roupael, S. & Hamadeh, B.** 2012. Morphological characterization of prickly pears (*Opuntia ficus indica* (L.) Mill.) cultivated in Lebanon. *Int. J. Sci. Res.*, 3(6): 2541–2553.
- Chávez Moreno, C.K., Tecante, A. & Casas, A.** 2009. The *Opuntia* (Cactaceae) and *Dactylopius* (Hemiptera: Dactylopiidae) in Mexico: a historical perspective of use, interaction and distribution. *Biodiversity Conserv.*, 18: 3337–3355.
- Chavez Santoscoy, R.A., Gutierrez Uribe, J.A. & Serna Saldivar, S.O.** 2009. Phenolic composition, antioxidant capacity and in vitro cancer cell cytotoxicity of nine prickly pear (*Opuntia* spp.) juices. *Plant Foods Hum. Nutr.*, 64: 146–152.
- Chermiti, A.** 1998. Utilisation des figues de Barbarie en remplacement de la mélasse dans les blocs nutritionnels. Effets sur l'ingestion volontaire. *Ann. Zootech.*, 47: 179–184.
- Cheryan, M.** 1998. *Ultrafiltration and microfiltration handbook*. Second edition. Lancaster, USA, CRS Press. 527 pp.
- Chessa, I.** 2010. Cactus pear genetic resources conservation, evaluation and uses. *Cactusnet Newsletter*, 12 [Special issue]: 45–53.
- Chessa, I. & Barbera, G.** 1984. Indagine sulla frigoconservazione dei frutti della cv 'Gialla' di ficodindia. *Frutticoltura*, 46: 57–61.
- Chessa, I. & Nieddu, G.** 1997. Descriptors for Cactus pear (*Opuntia* spp.). *Cactusnet Newsletter*, [Special issue]: 39.
- Chessa, I. & Schirra, M.** 1992. Prickly pear cv 'Gialla': intermittent and constant refrigeration trials. *Acta Hort.*, 296: 129–137.
- Chessa, I., Nieddu, G., Serra, P., Inglese, P. & La Mantia, T.** 1997. Isozyme characterization of *Opuntia* species and varieties from Italian germplasm. *Acta Hort.*, 438: 45–56.
- Chessa, I., Erre, P., Barbato, M., Ochoa, J. & Nieddu, G.** 2013. Polymorphic microsatellite DNA markers in *Opuntia* spp. collections. *Acta Hort.*, 995: 3–50.
- Chinnock, R.J.** 2015. Feral opuntoid cacti in Australia. *J. Adelaide Bot. Gard.*, 3 [Supplement]: 69.
- Chironi, S. & Ingrassia, M.** 2015. Study of the importance of emotional factors connected to the colors of fresh-cut cactus pear fruits in consumer purchase choices for a marketing positioning strategy. Proceedings of the VIII International Congress on Cactus Pear and Cochineal. *Acta Hort.*, 1067: 209–216.
- Cho, J.Y., Park, S.C., Kim, T.W., Kim, K.S., Song, J.C., Kim, S.K., Lee, H.M., Sung, H.J., Park, H.J., Song, Y.B., Yoo, E.S., Lee, Ch. & Rhee, M.H.** 2006. Radical scavenging and anti-inflammatory activity of extracts from *Opuntia humifusa* Raf. *J. Pharm. Pharmacol.*, 58: 113–119.
- Chougui, N., Tamendjari, A., Hamiidj, W., Hallal, S. Barras, A., Richard, T. & Larbat, R.** 2013. Oil composition and characteristics of phenolic compounds of *Opuntia ficus-indica* seeds. *Food Chem.*, 139: 796–803.
- Cicala, A., Fabbri, A., Di Grazia, A., Tamburino, A. & Valenti, C.** 1997. Plant shading and flower induction in *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. *Acta Hort.*, 438: 57–64.
- Cissé, M., Vaillant, F., Pallet, D. & Dornier, M.** 2011. Selecting ultrafiltration and nanofiltration membranes to concentrate anthocyanins from roselle extract (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Food Res. Int.*, 44: 2607–2614.
- Claassens, A.S. & Wessels, A.B.** 1997. The fertiliser requirement of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) under summer rainfall conditions in South Africa. *Acta Hort.*, 438: 83–95.
- Claps, L.E. & de Haro, M.E.** 2001. Coccoidea (Insecta: Hemiptera) associated with Cactaceae in Argentina. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 4: 77–83.
- Coetzer, G.M. & Fouche, H.J.** 2015. Fruit yield and quality of cactus pear (*Opuntia* spp.) cultivars in the Central Free State, South Africa. *Acta Hort.*, 1067: 89–96.
- Colunga García, M.P., Hernández Xolocotzi, E. & Castillo, A.** 1986. Variación morfológica, manejo agrícola y grados de domesticación de *Opuntia* spp. en El Bajío guanajuatense. *Agrociencia*, 65: 7–49.
- Consoli, S., Inglese, G. & Inglese, P.** 2013. Determination of evapotranspiration and annual biomass productivity of a cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. (Mill.)) orchard in a semi-arid environment. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 139: 680–690.
- Corbo, M.R., Altieri, C., D'Amato, D., Campaniello, D., Del Nobile, M.A. & Sinigaglia, M.** 2004. Effect of temperature on shelf-life of lightly processed cactus pear fruit. *Postharvest Biol. Technol.*, 31: 93–104.
- Cordeiro dos Santos, D. & Gonzaga de Albuquerque, S.** 2001. Fodder nopal use in the semi-arid northeast of Brazil. In C. Mondragón Jacobo & S. Pérez González, eds. *Cactus (Opuntia spp.) as forage*, pp. 37–50. FAO Plant Production and Protection Paper No. 169. Rome, FAO.
- Coria Cayupán, Y.S., Targa, G., Ochoa, M.J. & Nazareno, M.A.** 2009. Bioactive substance content and antioxidant activity changes during cooled storage of yellow spineless cactus pears. *Acta Hort.*, 811: 131–136.
- Coria Cayupán, Y.S., Ochoa, M.J. & Nazareno, M.A.** 2011. Health-promoting substances and antioxidant properties of *Opuntia* sp. fruits. Changes in bioactive-compound contents during ripening process. *Food Chem.*, 126: 514–519.
- Cornelis, W.M.** 2006. Hydroclimatology of wind erosion in arid and semiarid environments. In *Dryland ecohydrology*, pp. 141–159. Netherlands, Springer.
- Corrales García, J.** 2010. Perspectivas agroindustriales de la postcosecha de nopalito y la tuna. *Rev. Salud Pública Nutr.*, 5 [Edición Especial]: 1–22.
- Corrales García, J. & Flores Valdez, C.A.** 2003. Tendencias actuales y futuras en el procesamiento del nopal y la tuna. In C.A. Flores Valdez, ed. *Nopalitos y tunas, producción, comercialización, poscosecha e industrialización*, pp. 167–215. Mexico, Autonomous University of Chapingo.
- Corrales García, J., Andrade Rodríguez, J. & Bernabé Cruz, E.** 1997. Response of six cultivars of tuna fruits to cold storage. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 2: 160–168.
- Corrales García, J., Peña Valdivia, C.B., Razo Martínez, Y. & Sánchez Hernández, M.** 2004. Acidity changes and pH-buffering capacity of nopalitos (*Opuntia* spp.). *Postharvest Biol. Technol.*, 32: 169–174.
- Costa, R.G., Filho, E.M.B., Nunes De Medeiros, A., Givisiez, P.E.N., Queiroga, R.C.R.E. & Melo, A.A.S.** 2009. Effects of increasing levels of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. Miller) in the diet of dairy goats and its contribution as a source of water. *Small Ruminant Res.*, 82: 62–65.
- Costa, R.G., Trevino, I.H., De Medeiros, G.R., Medeiros, A.N., Pinto, T.F. & De Oliveira, R.L.** 2012. Effects of replacing corn with cactus pear (*Opuntia ficus indica* Mill) on the performance of Santa Inês lambs. *Small Ruminant Res.*, 102: 13–17.
- Crisosto, C.H. & Valero, D.** 2008. Harvesting and postharvest handling of peaches for the fresh market. In Layne and Bassi, eds. *The peach: Botany, production and uses*, pp. 575–596. CAB International.
- Crosby, A.W.** 1992. *The Columbian exchange. Biological and cultural consequences of 1492*. Turin, Italy, Einaudeditore.
- Curtis, J.R.** 1977. Prickly pear farming in the Santa Clara Valley, California. *Econ. Bot.*, 31: 175–179.
- Da Costa, M. & Huang, B.** 2009. Physiological adaptations of perennial grasses to drought stress. In E. De la Barrera & W. Smith, eds. *Perspectives in biophysical plant ecophysiology: A tribute to Park S. Nobel*, pp. 169–190. Mexico City, UNAM.

- D'Aquino, S., Agabbio, M., Piga, A., Pilo, G. & Sassu, M.M.** 1996. Influenza di alcuni fungicidi sullo sviluppo dei marciumi in frutti di fico d'India frigoconservati. *Italus Hortus*, 3: 32–37.
- D'Aquino, S., Barberis, A., Continella, A., La Malfa, S., Gentile, A. & Schirra, M.** 2012. Individual and combined effects of postharvest dip treatments with water at 50 °C, soy lecithin and sodium carbonate on cold stored cactus pear fruits. *Commun. Agric. Appl. Biol. Sci. (Univ. Ghent)*, 77: 207–217.
- D'Aquino, S., Chessa, I. & Schirra, M.** 2014. Heat treatment at 38 °C and 75–80% relative humidity ameliorate storability of cactus pear fruit (*Opuntia ficus-indica* cv 'Gialla'). *Food Bioprocess Technol.*, 7: 1066–1077.
- D'Aquino, S., Palma, A., Schirra, M., Continella, A., La Malfa, S. & Gentile, A.** 2015. Decay control of cactus pear by pre- and post-cold storage and water at 50 °C. *Acta Hort.*, 1067: 119–125.
- Da Silva Vilela, M., De Andrade Ferreira, M., De Azevedo, M., Modesto, E.C., Vasconcelos Guimarães, A. & Bispo, S.V.** 2010. Effect of processing and feeding strategy of the spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* Mill.) for lactating cows: Ingestive behavior. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 125: 1–8.
- De Acosta, J.** 1990. In O. Di Lullo, 1944. *El folklore de Santiago del Estero*, 1: 385. Publicación Oficial. Santiago del Estero.
- De Felice, M.S.** 2004. Prickly pear cactus, *Opuntia* spp. A spine-tingling tale. *Weed Technol.*, 18: 869–877.
- De Haro, M.E. & Claps, L.E.** 1999. Primera cita de *Dactylopius coccus* (Hemiptera: Dactylopiidae) para la República Argentina. *Rev. Soc. Entomol. Argent.*, 58: 128.
- Deidda, P., Nieddu, G. & Spano, D.** 1992. Reproductive behaviour of cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. in Sardinia. En *Actas II Congreso Internacional de Tuna y Cochinilla*, 22–25 septiembre 1992, Santiago de Chile, pp. 19–23.
- De Kock, G.C.** 1980. Drought-resistant fodder shrub crops in South Africa. In H.N. Le Houérou, ed. *Browse in Africa: The current state of knowledge*, pp. 399–410. Addis Ababa, International Livestock Centre for Africa.
- De Kock, G.C. & Aucamp, J.D.** 1970. *Spineless cactus. The farmer's provision against drought*, pp. 1–11. Leaflet No. 37. Agricultural Research Institute of the Karoo Region, Dept. Agric. Tech. Services.
- De la Barrera, E. & Nobel, P.S.** 2004. Carbon and water relations for developing fruits of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, including effects of drought and gibberellic acid. *J. Exp. Bot.*, 55(397): 719–729.
- De la Cruz, M., Ramírez, F. & Hernández, H.** 1997. DNA isolation and amplification from cacti. *Plant Mol. Biol. Rep.*, 15: 319–325.
- De Léo, M., De Abreu, M.B., Pawlowska, A.M., Cioni, P.L. & Braca, A.** 2010. Profiling the chemical content of *Opuntia ficus-indica* flowers by HPLC-PDA-ESI-MS and GC/EIMS analyses. *Phytochem. Lett.*, 3: 48–52.
- Delgado, A.E. & Sun, D.W.** 2000. Heat and mass transfer for predicting freezing processes, a review. *J. Food Eng.*, 47: 157–174.
- Delgado Sánchez, P., Yáñez Espinosa, L., Jiménez Bremont, J.F., Chapa Vargas, L. & Flores, J.** 2013. Ecophysiological and anatomical mechanisms behind the nurse effect: Which are more important? A multivariate approach for cactus seedlings. *PLoS ONE*, 9(4): e95405.
- De Lotto, G.** 1974. On the status and identity of the cochineal insects (Homoptera: Coccoidea: Dactylopiidae). *J. Entomol. Soc. South. Afr.*, 37: 167–193.
- Del Nobile, M.A., Licciardello, F., Scrocco, C., Muratore, G. & Zappa, M.** 2007. Design of plastic packages for minimally processed fruits. *J. Food Eng.*, 79: 217–224.
- Del Nobile, M.A., Conte, A., Scrocco, C. & Brescia, I.** 2009. New strategies for minimally processed cactus pear packaging. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, 10: 356–362.
- Del Valle, V., Hernandez Muñoz, P., Guarda, A. & Galotto, M.J.** 2005. Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus-indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life. *Food Chem.*, 91: 751–756.
- De Lyra, M.C.C.P., Santos, D.C., Mondragón Jacobo, C., da Silva, M.L.R.B., Mergulhão, A.C.E.S. & Martínez Romero, E.** 2013a. Isolation and molecular characterization of endophytic bacteria associated with the culture of forage cactus (*Opuntia* spp.). *J. Appl. Biol. Biotechnol.*, 1(01): 006–010.
- De Lyra, M.C.C.P., Santos, D.C., Da Silva, M.L.R.B., Martínez Romero, E. & Mondragón Jacobo, C.** 2013b. Molecular characteristics of *Opuntias* based on internal transcribed spacer sequences (ITS) of Queretaro State – Mexico. *Acta Hort.* 995: 99–108.
- De Micco, V. & Aronne, G.** 2012. Morpho-anatomical traits for plant adaptation to drought: plant responses to drought stress. In R. Aroca, ed. *Plant responses to drought stress from morphological to molecular features*, pp. 37–61. 461 pp.
- De Waal, H.O., Schwalbach, L.M.J., Combrinck, W.J., Shiningavame, K.L. & Els, J.** 2013a. Commercialisation of sun-dried cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) cladodes in feedlot diets for Dorper Wether lambs. *Acta Hort.*, 995: 343–350.
- De Waal, H.O., Fouché, H., de Wit, M., Zimmermann, H.G. & Louhaichi, M.** 2013b. *Cactus pear in South Africa: History, challenges, and potential* (available at <http://www.icaarda.org/sites/default/files/Cactus-Pear-in-South-Africa-new-%281%29.pdf>).
- De Waal, H.O., Jouhaichi, M., Taguchi, M., Fouché, H. & de Wit, M., eds.** 2015. Development of a cactus pear agro-industry for the sub-Saharan Africa region. *Cactusnet Newsletter*, 14 [Special Issue]. 94 pp.
- De Wit, M., Nel, P., Osthoff, G. & Labuschagne, M.T.** 2010. The effect of variety and location on cactus pear fruit quality. *Plant Foods Hum. Nutr.*, 65(2): 136–145.
- De Wit, M., Bothma, C., Swart, P., Frey, M. & Hugo, A.** 2014. Thermal treatment, jelly processing and sensory evaluation of cactus pear fruit juice. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 16: 1–14.
- Díaz, M.I.** 2003. Rescate del colonche y elaboración de vino de tuna. En *Memorias IX Congreso Nacional y VII Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*, 2–6 September, Zacatecas, Mexico, pp. 256–259.
- Díaz, F., Santos, E.M., Filardo, S., Villagómez, R. & Scheinvar, L.** 2006. Colorant extraction from a red prickly pear (*Opuntia lasiacantha*) for food application. *Electron. J. Environ., Agric. Food Chem.*, 5: 1330–1337.
- Díaz del Castillo, B.** 1991. *Historia verdadera de la conquista de la Nueva España* (ca. 1568), pp. 109–117. TEA.
- Díaz Franco, A. & Maya Hernandez, V.** 2014. *Producción de nopal de verdura de invierno en microtuneles en Tamauilipas*. Despliegue para productores. Mexico, INIFAP, CIRNO.
- Díaz Medina, E.M., Rodríguez Rodríguez, E.M. & Díaz Romero, C.** 2007. Chemical characterization of *Opuntia dillenii* and *Opuntia ficus-indica* fruits. *Food Chem.*, 103: 38–45.
- Diguet, L.** 1928. *Les cactacées utiles du Mexique*. Archives d'Histoire Naturelles, Soc. Nat. D'Acclimatation de France, Paris. 552 pp.
- Di Lullo, O.** 1944. *El folklore de Santiago del Estero*. Publicación Oficial, Santiago del Estero.
- Dimitris, L., Pompodakis, N., Markellou, E. & Lionakis, S.M.** 2005. Storage response of cactus pear fruit following hot water brushing. *Postharvest Biol. Technol.*, 38: 145–151.
- Dodd, A.P.** 1940. *The biological campaign against prickly pear*. Commonwealth Prickly Pear Board Bulletin. Brisbane, Australia, Government Printer. 177 pp.
- D'Oodorico, P. & Porporato, A.** 2006. Ecohydrology of arid and semiarid ecosystems, an introduction. In *Dryland ecohydrology*, pp. 1–10. Netherlands, Springer.
- Dok Go, H., Lee, K.H., Kim, H.J., Lee, E.H., Lee, J., Song, Y.S., Lee, Y.H., Jin, C. Lee, Y.S. & Cho, J.** 2003. Neuroprotective effects of antioxidative flavonoids, quercetin, (+)-dihydroquercetin and quercetin 3-methyl ether, isolated from *Opuntia ficus-indica* var. saboten. *Brain Res.*, 965(13): 130–136.
- Domingues, O.** 1963. *Origem e introdução da palma forrageira no Nordeste*. Recife, Brazil, Instituto Joaquim Nabuco de Pesquisas Sociais.
- Donkin, R.A.** 1977. Spanish red: An ethnographic study of cochineal and the *Opuntia* cactus. *Trans. Am. Philos. Soc.*, 67(5): 1–77.
- Doran, J.W.** 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agric., Ecosyst. Environ.*, 88: 119–127.
- Doria, G.** 1992. Piante en animali protogonisti dell'integrazione atlantica. In L. Capocaccia Orsini & G. Doria, *Animali e piante dall'America all'Europa*. Genova, Italy, SAGEP.
- Drennan, P.M.** 2009. Temperature influences on plant species of arid and semi-arid regions with emphasis on CAM succulents. In E. De la Barrera & W. Smith, eds. *Perspectives in biophysical plant ecophysiology: A tribute to Park S. Nobel*, pp. 57–94. Mexico City, UNAM.
- Drennan, P.M. & Nobel, P.S.** 1998. Root growth dependence on soil temperature for *Opuntia ficus-indica*: influences of air temperature and a doubled CO₂ concentration. *Funct. Ecol.*, 12: 959–964.
- Drennan, P.M. & Nobel, P.S.** 2000. Responses of CAM species to increasing atmospheric CO₂ concentrations. *Plant, Cell Env.*, 23: 767–781.
- Dubeux Jr, J.C.B. & Santos, M.V.F.** 2005. dos. Exigências nutricionais da palma forrageira. In R.S.C. Menezes, D.A. Simões & E.V.S.B. Sampaio, eds. *A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual e novas perspectivas de uso*, pp. 105–128. Recife, Brazil, Editora Universitária UFPE.
- Dubeux, Jr, J.C.B., Santos, M.V.F. dos, Lira, M.A., Santos, D.C. dos, Farias, I., Lima, L.E. & Ferreira, R.L.C.** 2006. Productivity of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller under different N and P fertilization and plant population in north-east Brazil. *J. Arid Environ.*, 67: 357–372.

- Dubeux Jr, J.C.B., Saraiva, F.M., Santos, D.J.C. dos., Lira, M.A., Santos, M.V.F. dos. & Silva, N.G. de M. 2011a. *Exigências nutricionais e adubação da palma forrageira*. 2º Congresso Brasileiro de Palma e Outras Cactáceas, Garanhuns, PE.
- Dubeux, Jr, J.C.B., Muir, J.P., Santos, M.V.F., Vendramini, J.M.B., Mello, A.C.L. & Lira, M.A. 2011b. Improving grassland productivity in the face of economic, social, and environmental challenges. *Braz. J. Anim. Sci.*, 40: 280–290.
- Dubeux Jr, J.C.B., dos Santos, M.V.F., Cavalcante, M. & dos Santos, D.C. 2013. *Potencial da palma forrageira na América do sul* Proceedings of the Second Meeting for the Integral Use of Cactus Pear and Other Cacti and First South American Meeting of FAO–ICARDA CactusNet, 12–19 September 2012, Santiago del Estero, Argentina. 175 pp.
- Dubeux, Jr, J.C.B., dos Santos, D.C., Lira, M. de A., dos Santos, M.V.F., Lima, G.F. da C., de Mello, A.C.L., Ferreira, M. de A. & da Cunha, M.V. 2015a. Global use of cactus as livestock feed. In H.O. De Waal, M. Louhaichi, M. Taguchi, H.J. Fouche & M. de Wit, eds. *Development of cactus pear agroindustry for the sub-Saharan African Region*. Proceedings of the International Workshop, 27–28 January 2015, University of the Free State, Bloemfontein, South Africa. 96 pp.
- Dubeux, Jr, J.C.B., dos Santos, M.V.F., De Mello, A.C.L., Da Cunha, M.V., Ferreira, M. De A., Dos Santos, D.C., Lira, M. De A. & Silva, M. Da C. 2015b. Forage potential of cacti on drylands. *Acta Hortic.*, 1067: 181–186.
- Dubrovsky, J.G., North, G.B. & Nobel, P.S. 1998. Root growth, developmental changes in the apex, and hydraulic conductivity for *Opuntia ficus-indica* during drought. *New Phytol.*, 138: 75–82.
- Duru, B. & Turker, N. 2005. Changes in physical properties and chemical composition of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) during maturation. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 7: 22–33.
- Eames, A.J. 1961. *Morphology of the angiosperms*. 518 pp.
- Einkamerer, O.B. 2008. *Animal performance and utilization of Opuntia-based diets by sheep*. Bloemfontein, South Africa, University of the Free State (MSc dissertation).
- Einkamerer, O.B., De Waal, H.O., Combrinck, W.J. & Fair, M.D. 2009. Feed utilization and growth of Dorper wethers on *Opuntia*-based diets. *S. Afr. J. Anim. Sci.*, 39 [Supplement 1]: 53–57.
- Enigbocan, M.A., Felder, T.B., Thompson, J.O., Kuti, J.O. & Ekpenyong, K.I. 1996. Hypoglycaemic effects of *Opuntia ficus-indica* Mill., *Opuntia lindheimeri* Engelm. and *Opuntia robusta* Wendl. in streptozotocin-induced diabetic rats. *Phytother. Res.*, 10: 379–382.
- Ennouri, M., Evelyne, B., Laurence, M. & Hamadi, A. 2005. Fatty acid composition and rheological behaviour of prickly pear seed oils. *Food Chem.*, 93: 431–437.
- Ennouri, M., Fetoui, H., Bourret, E., Zeghal, N., Guermazi, F. & Hamadi, A. 2006a. Evaluation of some biological parameters of *Opuntia ficus-indica*. 1. Influence of a seed oil supplemented diet on rats. *Bioresour. Technol.*, 97: 1382–1386.
- Ennouri, M., Fetoui, H., Bourret, E., Zeghal, N., Guermazi, F. & Hamadi, A. 2006b. Evaluation of some biological parameters of *Opuntia ficus-indica*. 2. Influence of seed supplemented diet on rats. *Bioresour. Technol.*, 97: 2136–2140.
- Ennouri, M., Fetoui, H., Hammami, M., Bourret, E., Hamadi, A. & Zeghal, N. 2007. Effects of diet supplementation with cactus pear seeds and oil on serum and liver lipid parameters in rats. *Food Chem.*, 101: 248–253.
- Erre, P. & Chessa, I. 2013. Discriminant analysis of morphological descriptors to differentiate the *Opuntia* genotypes. *Acta Hortic.*, 995: 43–50.
- Erre, P., Nieddu, G. & Chessa, I. 2013. Polymorphic microsatellite DNA markers in *Opuntia* spp. collections. *Acta Hortic.*, 995: 35–41.
- Erre, P., Chessa, I., Nieddu, G. & Jones, P.G. 2011. Diversity and spatial distribution of *Opuntia* spp. in the Mediterranean Basin. *J. Arid Environm.*, 73: 1058–1066.
- Escalante, M.A. 2013. *Producción intensiva de grana cochinilla en Morelos, México*. In L. Portillo & A.L. Viguera, eds. *Conocimiento y aprovechamiento de la grana cochinilla*, pp. 155–162. First edition. Mexico, University of Guadalajara.
- Esparza, J. 2014. *Valoración de atributos de calidad de la tuna (Opuntia ficus-indica (L.) en fresco y minimamente procesada y determinación de segmentos de mercado en residentes de la comuna de la Florida, Región Metropolitana*. University of Chile (thesis). 75 pp.
- Esparza, G., Esparza, F.J., Macias, E. & Mendez, G. 2006. Effect of ethephon on ripening of cactus pear fruits. *Acta Hortic.*, 728: 165–171.
- Faedda, R., Pane, A., Cacciola, S.O., Granata, G., Salafia, L. & Sinatra, F. 2015a. *Penicillium polonicum* causing a postharvest soft rot of cactus pear fruits. *Acta Hortic.*, 1067: 193–197.
- Faedda, R., Granata, G., Pane, A., Cacciola, S.O., D'Aquino, S., Palma, A., Sanzani, S.M. & Schena, L. 2015b. Postharvest fungal diseases of cactus pear fruits in southern Italy. *Acta Hortic.*, 1067: 193–197.
- FAO. 2011. *Manual de biogás*. FAO Regional Office for Latin America and the Caribbean, Santiago.
- Farias, I., Lira, M. de A., Santos, D.C. dos, Fernandes, A.P.M., Tavares Filho, J.J. & Santos, M.V.F. dos. 1989. Efeito de frequência e intensidade de cortes em diferentes espaçamentos na cultura da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica*, Mill), em consórcio com sorgo granífero (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Pesqui. Agropecu. Pernambuco, Recife*, 6 [especial]: 169–183.
- Farias, I., Lira, M. de A., Santos, D.C. dos, Tavares Filho, J.J., Santos, M.V.F. dos & Fernandes, A.P.M. 2000. Manejo de colheita e espaçamento da palma forrageira, em consórcio com sorgo granífero, no Agreste de Pernambuco. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, 35(2): 341–347.
- Farias, I., Santos, D.C. dos & Dubeux Jr, J.C.B. 2005. Estabelecimento e manejo da palma forrageira. In R.S.C. Menezes, D.A. Simões & E.V.S.B. Sampaio, eds. *A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual e novas perspectivas de uso*, pp. 81–104. Recife, Brazil, Editora Universitária da UFPE.
- Faust, M. 1989. *Physiology of temperate zone fruit trees*. New York, USA, John Wiley & Sons, Inc.
- Fehlberg, S.D., Allen, J.M. & Church, K. 2013. A novel method of genomic DNA extraction for Cactaceae. *Appl. Plant Sci.*, Mar. 1(3).
- Felker, P. 1995. Forage and fodder production and utilization. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 144–154. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Felker, P. & Bunch, R.A. 2009. Mineral nutrition of cactus for forage and fruits. *Acta Hortic.*, 811: 389–394.
- Felker, P. & Guevara, J.C. 2001. An economic analysis of dryland fruit production of *Opuntia ficus-indica* in Santiago del Estero, Argentina. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 20–30.
- Felker, P. & Inglese, P. 2003. Short-term and long-term research needs for *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. utilization in arid areas. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 5: 131–151.
- Felker, P. & Russel, C. 1988. Effects of herbicides and cultivation on the growth of *Opuntia* in plantations. *J. Hortic. Sci.*, 63: 149–155.
- Felker, P., Rodríguez, S. del C., Casoliba, R.M., Filippini, R., Medina, D. & Zapata, R. 2005. Comparison of *Opuntia ficus-indica* cultivars of Mexican and Argentine origin for fruit yield and quality in Argentina. *J. Arid Environ.*, 60: 405–422.
- Felker, P., Paterson, A. & Jenderek, M.M. 2006. Forage potential of *Opuntia* clones maintained by the USDA, National Plant Germplasm System (NPGS) collection. *Crop Sci.*, 46: 2161–2168.
- Felker, P., Bunch, R., Russo, G. & Tani, J.A. 2010. *Progreso en la identificación del agente causal de Engrosamiento del cladodio o macho*. *Rev. Salud Publica Nutr.*, [Edición Especial]: 5.
- Fernández, M.M.R., Vázquez R., J. & Villalobos, J.A. 1990. Fertilización preliminar de nopal verdura en Milpa Alta, D.F. En Memorias del IV Reunión Nacional y II Congreso Internacional Sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. SOMECH, A.C., INCA-Rural–CECCAM. Zacatecas, Mexico. 29 pp.
- Fernández, M., Lin, E.C.K., Trejo, A. & McNamara, D.J. 1994. Prickly pear (*Opuntia* sp.) pectin alters hepatic cholesterol metabolism without affecting cholesterol absorption in Guinea pigs fed a hypercholesterolemic diet. *J. Nutr.*, 124: 817–824.
- Fernández López, J., Almela, L, Obón, J.M. & Castellar, R. 2010. Determination of antioxidant constituents in cactus pear fruits. *Plant Foods Hum. Nutr.*, 65: 253–259.
- Fester, G.A. 1941. Colorantes de insectos. *An. Soc. Cient. Argent.*, 131: 100–103.
- Fester, G.A. & Lexow, S. 1943. Colorantes de insectos (2ª comunicación). *An. Soc. Cient. Argent.*, 135: 89–96.
- Feugang, J.M., Konarski, P., Zou, D., Stintzing, F.C. & Zou, C. 2006. Nutritional and medicinal use of cactus (*Opuntia* spp.) cladodes and fruits. *Front. Biosci.*, 11: 2574–2589.
- Feugang, J.M., Ye, F., Zhang, D.Y., Yu, Y., Zhong, M., Zhang, S. & Zou, C. 2010. Cactus pear extracts induce reactive oxygen species production and apoptosis in ovarian cancer cells. *Nutr. Cancer*, 62: 692–699.
- FIA (Foundation for Agrarian Innovation). 2010. *Estudio de la cadena productiva de la tuna*. Study commissioned to the University of Chile by FAI, Ministry of Agriculture Chile. 165 pp.
- Fierro A., A., González L., M.M., Rodríguez A., F., Olivares O., J., Zavaleta B., P., Montiel S., D., Martínez P., M.A. & Soto O., D.M. 2003. Evapotranspiración del nopal verdura (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) var. Milpa Alta, en el sur del D.F. En Memoria del IX Congreso Nacional y VII Congreso Internacional Sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Zacatecas, pp. 180–182.

- Figueiredo, E. & Smith, G.F.** 2008. *Plants of Angola*. Strelitzia 22. Pretoria, SANBI. 279 pp.
- El Finti, A., Belayadi, M., Boullania, R.E., Msanda, F., Serghini, M.A. & Mousadiq, A.E.** 2013. Genetic structure of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) in Moroccan collection. *Asian J. Plant Sci.*, 12: 145–148.
- Flores, A.** 1992. Producción de vino y aguardiente de tuna, alternativa en el aprovechamiento del nopal. *Cienc. Desarrollo*, 17: 56–68.
- Flores, V.I.** 1995. Crianza de la cochinilla en Sudamérica. En Memorias del Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, 6° Congreso Nacional y 4° Internacional. Universidad de Guadalajara, Jalisco, Mexico, pp. 48–55.
- Flores B., S.** 2013. *Fertilización y frecuencia de riego en la producción de nopal verdura (Opuntia ficus-indica L.) en túnel de plástico*. Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad, Fruticultura. Montecillo, Texcoco, Edo. de México (MSc thesis). 66 pp (available at http://www.biblio.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/10521/20071/Flores_Barrera_S_MC_Fruticultura_2013.pdf).
- Flores Flores, V. & Tekelenburg, A.** 1995. Dactil (*Dactylopius coccus* Costa) dye production. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 167–185. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Flores Flores, R., Velazquez del Valle, M.G., León Rodríguez, R., Flores Moctezuma, H.E. & Hernández Lauzardo, A.N.** 2013. Identification of fungal species associated with cladode spot of prickly pear and their sensitivity to chitosan. *J. Phytopathol.*, 161: 544–552.
- Flores Hernández, A., Orona C., I., Martínez M., J.M., Rivera G., M. & Hernández M., J.G.** 2004. Productividad del nopal para verdura (*Opuntia* spp) bajo riego por goteo subterráneo en la Comarca Lagunera. *Rev. Chapingo Ser. Zonas Áridas*, 3: 99–104.
- Flores Hernandez, A., Murillo Amador, B., Rueda Puente, E., Salazar Torres, J., García Hernandez, J.L. & Troyo Dieguez, E.** 2006. Reproducción de cochinilla silvestre *Dactylopius opuntiae* (Homoptera: Dactylopiidae). *Rev. Mex. Biodivers.*, 77: 97–102.
- Flores Valdez, C.A.** 1995. *Nopalitos* production, processing and marketing. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 92–99. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Flores Valdez, C.A.** 2003. Producción y comercialización de la tuna. In J. Corrales García & C.A. Flores Valdez, eds. *Nopalitos y tuna producción, comercialización postcosecha e industrialización*, pp. 57–58.
- Fontaine, C., Guimarães, P.R., Jr, Kéfi, S., Loeuille, N., Memmott, J., van der Putten, W.H., van Veen F.J.F. & Thébaud, E.** 2011. The ecological and evolutionary implications of merging different types of networks. *Ecol. Lett.*, 14: 1170–1181.
- Foxcroft, L.C. & Hoffmann, J.H.** 2000. Dispersal of *Dactylopius opuntiae* Cockerell (Homoptera: Dactylopiidae), a biological control agent of *Opuntia stricta* (Haworth.) Haworth. (Cactaceae) in the Kruger National Park. *Koedoe*, 43(2): 1–5.
- Franck, N.** 2006. Alternativas para la producción de bioenergía en las zonas áridas y semiáridas de Chile. In E. Acevedo, ed. *Agroenergía, un desafío para Chile*, pp. 137–148. Serie Ciencias Agronómicas No. 11. Santiago, Chile, University of Chile. 176 pp.
- Franck, N.** 2010. *Perspectivas de la tecnificación del cultivo de la tuna*. Instituto de investigaciones agropecuarias, centro de investigación especializado en agricultura del desierto y altiplano, INIA Ururi, Región de Arica y Parinacota. Ministerio de Agricultura de Chile. Informativo 21, Mayo.
- Franco, A. & Ponte, J.J.** 1980. A podridão poliana da palma forrageira. *Fitopatol. Bras.*, 5: 277–282.
- Frati Munari, A.C., Xilotl Diaz, N., Altamirano, P., Ariza, R. & Lopez Ledesma, R.** 1991. The effect of two sequential doses of *Opuntia streptacantha* upon glycemia. *Arch. Invest. Med. Mexico*, 22: 333–336.
- Frati Munari, A.C., Vera Lastra, O. & Ariza Andraca, C.R.** 1992. Evaluation of nopal capsules in diabetes mellitus. *Gac. Med. Mex.*, 128: 431–436.
- Frati Munari, A.C., Fernández Harp, J.A., de la Riva, H., Ariza Andraca, R. & del Carmerritorres, M.** 2004. Effect of nopal (*Opuntia* sp.) on serum lipids, glycaemia and body weight. *Am. J. Clin. Nutr.*, 80: 668–673.
- Freeman, T.P.** 1969. The developmental anatomy of *Opuntia basilaris*. I. Embryo, root, and transition zone. *Am. J. Bot.*, 56: 1067–1074.
- Freeman, T.** 1970. The developmental anatomy of *Opuntia basilaris*. II. Apical meristem, leaves, areoles, glochids. *Am. J. Bot.*, 57(6): 616–622.
- Fucikovsky Zak, L., Yáñez Morales, M. de Jesús, Alanis Martínez, I. & González Pérez, E.** 2011. New hosts of 16SrI phytoplasma group associated with edible *Opuntia ficus-indica* crop and its pests in Mexico. *Afr. J. Microbiol. Res.*, 5: 910–918.
- Galati, E.M., Monforte, M.T., Tripodo, M.M., d'Aquino, A. & Mondello, M.R.** 2001. Antitumor activity of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae): ultrastructural study. *J. Ethnopharmacol.*, 76: 1–9.
- Galati, E.M., Pergolizzi, S., Miceli, N., Monforte, M.T. & Tripodo M.M.** 2002. Study on the increment of the production of gastric mucus in rats treated with *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. cladodes. *J. Ethnopharmacol.*, 83: 229–233.
- Galati, E.M., Mondello, M.R., Giuffrida, D., Dugo, G., Miceli, N., Pergolizzi, S. & Taviano, M.F.** 2003a. Chemical characterization and biological effects of Sicilian *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Fruit juice: Antioxidant and antiulcerogenic activity. *J. Agric. Food Chem.*, 51: 4903–4908.
- Galati, E.M., Tripodo, M.M., Trovato, A., d'Aquino, A. & Monforte, M.T.** 2003b. Biological activity of *Opuntia ficus-indica* cladodes II: Effect on experimental hypercholesterolemia in rats. *Pharm. Biol.*, 41: 175–179.
- Galati, E.M., Mondello, M.R., Lauriano, E.R., Taviano, M.F., Galluzzo, M. & Miceli, N.** 2005. *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Fruit juice protects liver from carbon tetrachloride induced injury. *Phytother. Res.*, 19: 796–800.
- Gallegos Vázquez, C. & Mondragón Jacobo, C.** 2009. An update on the evolution of the cactus pear industry in Mexico. *Acta Hort.*, 811: 69–76.
- Gallegos Vázquez, C. & Mondragón Jacobo, C.** 2011. *Cultivares selectos de tuna, de México al Mundo*. Chapingo, Mexico, Autonomous University of Chapingo, SNICS–SAGARPA. 159 pp.
- Gallegos Vázquez, C., Cervantes Herrera, J. & Barrientos Priego, A.F.** 2005. *Manual gráfico para la descripción varietal del nopal tunero y xoconostle (Opuntia spp.)*. Chapingo, Mexico, Autonomous University of Chapingo, SNICS–SAGARPA. 116 pp.
- Gallegos Vazquez, C., Cervantes Herrera, J., Reyes Agüero, J.A., Fernandez Montes, R., Mondragón Jacobo, C., Luna, J.V., Martínez Gonzalez, J.C. & Rodriguez, S.** 2006. Inventory of the main commercial cactus pear (*Opuntia* spp.) cultivars in Mexico. *Acta Hort.*, 728: 17–28.
- Gallegos Vazquez, C., Mondragón Jacobo, C. & Reyes Agüero, J.A.** 2009. An update on the evolution of the cactus pear industry in Mexico. *Acta Hort.*, 811: 69–76.
- Gallegos Vazquez, C., Mendez Gallegos, S. de J. & Mondragón Jacobo, C.** 2013. *Producción sustentable de la tuna en San Luis Potosí*. San Luis Potosí, Mexico, Colegio de Postgraduados–Fundación San Luis Potosí Produce.
- Galizzi, F.A., Felker, P., Gonzalez, C. & Gardiner, D.** 2004. Correlations between soil and cladode nutrient concentrations and fruit yield and quality in cactus pears, *Opuntia ficus-indica* in a traditional farm setting in Argentina. *J. Arid Environ.*, 59: 115–132.
- Gandía Herrero, F., Jiménez Atienzar, M., Cabanes, J., García Carmona, F. & Escribano, J.** 2010. Stabilization of the bioactive pigment of *Opuntia* fruits through maltodextrin encapsulation. *J. Agric. Food Chem.*, 58: 10646–10652.
- Ganopoulos, I., Kalivas, A., Kavroulakis, N., Xanthopoulou, A., Mastrogianni, A., Koubouris, G. & Madesis, P.** 2015. Genetic diversity of barbary fig (*Opuntia ficus-indica*) collection in Greece with ISSR molecular markers. *Plant Gene*, 2: 29–33.
- García, J., Hernández, I., Tarango, L., Torres, M., Becerra, J., Pastor, F., Martínez, O., Valverde, A., García, J., Espinoza, A., Cedillo, I., Amente, A., Rössel, D. & Tiscareño, A.** 2003 *Programa Estratégico de Necesidades de Investigación y Transferencia de Tecnología en el Estado de San Luis Potosí Etapa II Caracterización de la cadena agroalimentaria del nopal tunero e identificación de sus demandas tecnológicas*. San Luis Potosí, Mexico, Colegio de postgraduados Campus San Luis Potosí Fundación Produce.
- García de Cortázar, V. & Nobel, P.S.** 1990. Worldwide productivity indices and yield predictions for a CAM plant, *Opuntia ficus-indica*, including effects of doubled CO₂ levels. *Agric. For. Meteorol.*, 49: 261–279.
- García de Cortázar, V. & Nobel, P.S.** 1991. Prediction and measurement of high annual productivity for *Opuntia ficus-indica*. *Agric. For. Meteorol.*, 56: 261–272.
- García de Cortázar, V. & Nobel, P.S.** 1992. Biomass and fruit production for the prickly pear cactus, *Opuntia ficus-indica*. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 117: 558–562.
- García de Cortázar, V. & Varnero, M.T.** 1995. Energy production. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 186–191. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- García Gil, F., Lanz Mendoza, H. & Hernández Hernández, F.C.** 2007. Free radical generation during the activation of hemolymph prepared from the homopteran *Dactylopius coccus*. *Arch. Insect Biochem. Physiol.*, 65: 20–28.
- García Moya, E., Romero Manzanares, A. & Nobel, P.S.** 2010. Highlights for *Agave* productivity. *GCB Bioenergy*, 3: 4–14.
- García Zambrano, E.A., Salinas, G., Vazquez, R., Cardenas, E. & Gutierrez A.** 2006. Clasificación y estimación de la diversidad genética de Nopal *Opuntia* spp. en base a descriptores fenotípicos y marcadores genéticos moleculares. *Phyton*, 75: 125–135.

- García Zambrano, E.A., Zavala García, F., Gutiérrez Diez, A., Ojeda Zacarias, M.C. & Cerda Hurtado, I. 2009. Estimation of the genetic diversity of *Opuntia* spp. using molecular markers AFLP. *Phyton*, 78: 117–120.
- Gareca, E. 1993. *Experiencias del PERTT en tuna-cochinilla*. En Memorias del III Seminario Regional de Tuna y Cochinilla. Tarija, Bolivia, pp. 36–37.
- Gathaara, G.N., Felker, P. & Land, M. 1989. Influence of nitrogen and phosphorus on *Opuntia engelmannii* tissue N and P concentrations, biomass production and fruit yields. *J. Arid Environ.*, 16: 337–346.
- Gebremariam, T., Melaku, S. & Alemu Yami, A. 2006. Effect of different levels of cactus (*Opuntia ficus-indica*) inclusion on feed intake, digestibility and body weight gain in tef (*Eragrostis tef*) straw-based feeding of sheep. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 131: 41–52.
- Gersani, M., Graham, A.E. & Nobel, P.S. 1993. Growth responses of individual roots of *Opuntia ficus-indica* to salinity. *Plant, Cell Env.*, 16: 827–834.
- Gharby, S., Harhar, H., Charrouf, Z., Bouzobaa, Z., Boujghagh, M. & Zine, S. 2015. Physicochemical composition and oxidative stability of *Opuntia ficus-indica* seed oil from Morocco. *Acta Hort.*, 1067: 83–88.
- El Gharras, H., Hasib, A., Jaouad, A. & El Bouadili, A. 2006. Caracterización química y física de tres variedades de higos chumbos amarillos de Marruecos (*Opuntia ficus-indica*) en tres etapas de madurez. *Cienc. Tecnol. Aliment.*, 5(2): 93–99.
- Ghazi, Z., Ramdani, M., Fauconnier, M.L., El Mahi, B. & Cheikh, R. 2013. Fatty acids sterols and vitamin E composition of seed oil of *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia Dillenii* from Morocco. *J. Mater. Environ. Sci.*, 4(6): 967–972.
- Gibson, A.C. 1976. Vascular organization in shoots of Cactaceae. 1. Development and morphology of primary vasculature in Pereskioideae and Opuntioideae. *Am. J. Bot.*, 63: 414–426.
- Gibson, A.C. 1977. Wood anatomy of opuntias with cylindrical to globular stems. *Bot. Gaz.*, 138: 334–351.
- Gibson, A.C. 1978a. Structure of *Pterocactus tuberosus*, a cactus geophyte. *Cact. Succ. J.*, 50: 41–43.
- Gibson, A.C. 1978b. Wood anatomy of platy-opuntias. *Aliso*, 9: 279–307.
- Gibson, A.C. & Horak, K.E. 1978. Systematic anatomy and phylogeny of Mexican columnar cacti. *Ann. Mo. Bot. Gard.*, 65: 999–1057.
- Gibson, A.C. & Nobel, P.S. 1986. *The cactus primer*. Cambridge, MA, USA, Harvard University Press.
- Gil, S.G. & Espinoza, R.A. 1980. Fruit development in the prickly pear with pre-anthesis application of gibberellin and auxin. *Cienc. Invest. Agrar.*, 7(2): 141–147.
- Gilson, A. 1999. A prickly passion. *SA Country Life*, 90–92.
- Githure, C.W., Zimmermann, H.G. & Hoffmann, J.H. 1999. Host specificity of biotypes of *Dactylopius opuntiae* (Cockerell) (Hemiptera: Dactylopiidae): prospects for biological control of *Opuntia stricta* (Haworth) Haworth (Cactaceae) in Africa. *Afr. Entomol.*, 7(1): 43–48.
- Gittens, C. 1993. Prickly pears can be a thorny problem. *Farmers Weekly*, 5 Feb.: 30–31.
- Given, D.R. 1994. *Principles and practice of plant conservation*. Portland, OR, USA, Timber Press.
- Goidanich, G. 1964. *Manuale di patologia vegetale*. Vol. II. Bologna, Italy, Edizioni Agricole.
- Goldstein, G., Andrade, J.L. & Nobel, P.S. 1991. Differences in water relations parameters for the chlorenchyma and parenchyma of *Opuntia ficus-indica* under wet versus dry conditions. *Aust. J. Plant Physiol.*, 18: 95–107.
- Gómez, H. 2013. *Estabilidad de betalainas en una bebida refrescante adicionada de microparticulas de pulpa de tuna púrpura, extracto ultrafiltrado y nanofiltrado*. Santiago, Faculty of Agronomic Sciences, University of Chile (Masters thesis).
- Gomez Casanovas, N., Blanc Betes, E., Gonzalez Meler, M.A. & Azcon Bieto, J. 2007. Changes in respiratory mitochondrial machinery and cytochrome and alternative pathway activities in response to energy demand underlie the acclimation of respiration to elevated CO₂ in the invasive *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiol.*, 145(1): 49–61.
- Gonzalez, C.L. 1989. Potential of fertilization to improve nutritive value of prickly pear cactus (*Opuntia lindheimerii* Engelm.). *J. Arid Environ.*, 16: 87–94.
- González, E.A., García, E.M. & Nazareno, M.A. 2009. Free radical scavenging capacity and antioxidant activity of cochineal (*Dactylopius coccus* C.) extracts. *Food Chem.*, 119: 358–362.
- Gorini, F., Testoni, A., Cazzola, R., Lovati, F., Bianco, M.G., Chessa, I., Schirra, M., Budroni, M. & Barbera, G. 1993. Aspetti tecnologici: Conservazione e qualità di fico d'India e avocado. *Inf. Agrar.*, 44: 89–92.
- Granata, G. 1995. Biotic and abiotic diseases. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 109–119. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Granata, G. & Sidoti, A. 1997. Appearance of Alternaria golden spot on cactus pear in Italy. *Acta Hort.*, 438: 129–130.
- Granata, G. & Sidoti, A. 2002. Survey of diseases discovered on *Opuntia ficus-indica* in producer countries. *Acta Hort.*, 581: 231–237.
- Granata, G. & Varvaro, L. 1990. Bacterial spots and necrosis caused by yeasts on prickly pear cactus in Sicily. In Proceedings of the 8th Congress of the Mediterranean Phytopathology Union, 28 October – 3 November, Agadir, Morocco, pp. 467–468.
- Granata, G., Paltrinieri, S., Botti, S. & Bertaccini, A. 2006. Aetiology of *Opuntia ficus-indica* malformations and stunting disease. *Ann. Appl. Biol.*, 149: 317–325.
- Grant, V. & Grant, K.A. 1982. Natural pentaploids in the *Opuntia linheimeri-phaeacantha* group in Texas. *Bot. Gaz.*, 143: 117–120.
- Griffith, M.P. 2003. Using molecular data to elucidate reticulate evolution in *Opuntia* (Cactaceae). *Madroño*, 50: 162–169.
- Griffith, M.P. 2004. The origins of an important cactus crop, *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): new molecular evidence. *Am. J. Bot.*, 91(11): 1915–1921.
- Griffith, M.P. & Porter, M. 2003. Back to the basics: A simple method of DNA extraction for mucilaginous cacti. *Bradleya*, 21: 126–128.
- Griffith, M.P. & Porter, M. 2009. Phylogeny of Opuntioideae (Cactaceae). *Int. J. Plant Sci.*, 170(1): 107–116.
- Griffiths, D. 1908. Illustrated studies in the genus *Opuntia* L. Rep. *Ann. Mo. Bot. Gard.*, 19: 259–272.
- Griffiths, D. 1909. *The "spineless" prickly pears*. USDA Bulletin No. 140. Washington, DC, Government Printing Office. 22 pp.
- Griffiths, D. 1912. The thornless prickly pears. *Farmers' Bull. USDA*, 483: 1–20.
- Griffiths, D. 1914. Reversion in prickly pears. *J. Heredity*, 5: 222–225.
- Griffiths, D. 1915. *Yields of native prickly pear in Southern Texas*. USDA Bulletin No. 208. Washington, DC, Government Printing Office. 11 pp.
- Griffiths, D. 1933. *Les cactus fourrage pour le bétail*. Bulletin de la Direction Générale de l'Agriculture du Commerce et de la Colonisation de Tunisie, pp. 313–338.
- Griffiths, H., Cousins, A.B., Badger, M.R. & von Caemmerer, S. 2007. Discrimination in the dark: resolving the interplay between metabolic and physical constraints to phosphoenolpyruvate carboxylase activity during the crassulacean acid metabolism cycle. *Plant Physiol.*, 143: 1055–1057.
- Grobler, M. 2005. *Control of unwanted plants*. 1st edition. XACT Information Publication.
- Groenewald, A. 1996. Ekstra oes turksvye-in winter. *Landbouweekblad*, 6 Dec.: 34–37.
- Grunert, K.G., Larsen, H., Madsen, T.K. & Baadsgaard, A. 1996. *Market orientation in food and agriculture*. Boston, USA, Kluwer.
- Guevara Figueroa, T., Jiménez Islas, H., Reyes Escogido, M., Mortensen, A., Laursen, B.B., Lin, L.W., De León Rodríguez, A., Fomsgaard, I.S. & Barba de la Rosa, A.P. 2010. Proximate composition, phenolic acids, and flavonoids characterization of commercial and wild nopal (*Opuntia* spp.). *J. Food Compos. Anal.*, 23: 525–532.
- Gugliuzza, G., Inglese, P. & Farina, V. 2002a. Relationship between fruit thinning an irrigation on determining fruit quality of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruits. *Acta Hort.*, 581: 205–210.
- Gugliuzza, G., La Mantia, T. & Inglese, P. 2002b. Fruit load and cladode nutrient concentrations in cactus pear. *Acta Hort.*, 581: 221–224.
- Gutiérrez, L.H. 1992. *Plagas y enfermedades del nopal en México*. Mexico, Autonomous University of Chapingo.
- Guttermann, Y. 1995. Environmental factors affecting flowering and fruit development of *Opuntia ficus-indica* cuttings during the three weeks before planting. *Isr. J. Plant Sci.*, 43: 151–157.
- Habibi, Y., Mahrouz, M. & Vignon, M.R. 2002. Isolation and structure of D-xylans from pericarp seeds of *Opuntia ficus-indica* prickly pear fruits. *Carbohydr. Res.*, 337: 1593–1598.
- Habibi, Y., Heyraud, A., Mahrouz, M. & Vignon, M.R. 2004. Structural features of pectic polysaccharides from the skin of *Opuntia ficus-indica* prickly pear fruits. *Carbohydr. Res.*, 339: 1119–1127.
- Hahm, S.W., Park, J. & Son, Y.S. 2010. *Opuntia humifusa* partitioned extracts inhibit the growth of U87MG human glioblastoma cells. *Plant Foods Hum. Nutr.*, 65: 247–252.
- Haile, M. & Belay, T. 2002. Current and potential use of cactus in Tigray, Northern Ethiopia. *Acta Hort.*, 581: 75–86.
- Haile, M., Belay, T. & Zimmermann, H.G. 2002. Current and potential use of cactus in Tigray, Northern Ethiopia. In A. Nefzaoui & P. Inglese, eds. Proceedings of the 4th International Congress on Cactus Pear and Cochineal. *Acta Hort.*, 581: 75–86.

- Hamilton, M.W. 1970. The comparative morphology of three cylindropuntias. *Am. J. Bot.*, 57: 1255–1263.
- Hammami, S.B.M., Aounallah, M.K., Sahli, A., Jebari, A. & Bettaieb, T. 2015. Modification of fruit growth and development of prickly pear according to the date of the second floral bud bloom. *Acta Hort.*, 1067: 27–30.
- Han, H. & Felker, P. 1997. Field validation of water-use efficiency of the CAM plant *Opuntia ellisiana* in south Texas. *J. Arid Environ.*, 36: 133–148.
- Harlev, E., Nevo, E., Mirsky, N. & Ofir, R. 2013. Cancer preventive and curative attributes of plants of the cactaceae family: A review. *Planta Med.*, 79: 713–722.
- Haulik, T. 1988. Vrughteverbouwing vir somerreenstreek 13: turksy as eetvrug maar nou eers ontgin. *Landbouweekblad*, 10 Jun.: 48–51.
- Hayashi, H. 1989. Drying technologies of foods – their history and future. *Drying Technol.*, 7: 315–369.
- Heath, R.R., Teal, P.E.A., Epsy, N.D., Dueben, B.D., Hight, S.D., Bloem, S., Carpenter, J.E., Weissling, T.J., Kendra, P.E., Cibrian Tovar, J. & Bloem, K.A. 2006. Pheromone-based attractant for males of *Cactoblastis cactorum* (Lepidoptera: Pyralidae). *Environ. Entomol.*, 35: 1469–1476.
- Hegwood, D.A. 1990. Human health discoveries with *Opuntia* sp. (prickly pear) indica (L.) Mill. cladodes in the wound-healing process. *J. Hortic. Sci.*, 25: 1315–1316.
- Helsen, P., Verdyck, P., Tye A. & Van Dongen, S. 2009. Low levels of genetic differentiation between *Opuntia echios* varieties on Santa Cruz (Galapagos). *Plant Syst Evol.*, 279: 1–10.
- Herbach, K.M., Stintzing, F.C. & Carle, R. 2006. Betalain stability and degradation – structural and chromatic aspects. *J. Food Sci.*, 71: R41–R50.
- Hernández Pérez, R., Noa Carrazana, J.C., Gaspar, R., Mata, P. & Flores Estévez, N. 2009a. Detection of phytoplasma on Indian Fig (*Opuntia ficus-indica* Mill.) in Mexico Central Region. *OnLine J. Biol. Sci.*, 9: 62–66.
- Hernández Perez, T., Mejía Centeno, J., Cruz Hernández, A. & Paredes López, O. 2009b. Biochemical and nutritional characterization of three prickly pear species with different ripening behaviour and nutraceutical value of nopalitos. *Acta Hort.*, 841: 515–518.
- Hester, S.M. & Cacho, O. 2003. Modelling apple orchard systems. *Agric. Syst.*, 77: 137–154.
- Hfaiedh, N., Salah Allagui, M., Hfaiedh, M., El Feki, A., Zourgui, L. & Croute, F. 2008. Protective effect of cactus (*Opuntia ficus-indica*) cladode extract upon nickel-induced toxicity in rats. *Food Chem. Toxicol.*, 46: 3759–3763.
- Hilbert, J. 2009. *Manual para la producción de biogás*. Instituto de Ingeniería Rural.
- Hoffmann, W. 1995. Ethnobotany. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 12–19. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Hoffmann, J.H., Impson, F.A.C. & Volchansky, C.R. 2002. Biological control of cactus weeds: Implications of hybridization between control agent biotypes. *J. Appl. Ecol.*, 39: 900–908.
- Hogan, C. 2015. *Cactus* (available at <http://www.eoearth.org/view/article/162162>).
- Hokkanen, H.M.T. & Pimentel, D. 1989. New association in biological control: theory and practice. *Can. Entomol.*, 121: 829–840.
- Homrani Bakali, A. 2013. Impact of irrigation frequencies on the installation and the production of two forms of *Opuntia ficus-indica*. *Acta Hort.*, 995: 145–156.
- Horst, R.K. 2013. *Westcott's plant disease handbook*. Netherlands, Springer.
- Hosking, J.R. 2012. *Opuntia* spp. In N. Julien, R. McFadyen & J. Cullen, eds. *Biological control of weeds in Australia*, pp. 431–436. Melbourne, Australia, CSIRO Publishing.
- Hosking, J.R., McFadyen, R.E. & Murray, N.D. 1988. Distribution and biological control of cactus species in eastern Australia. *Plant Prot. Q.*, 3: 115–123.
- Huffpost Algeria. 2015. *La figue de Barbarie, un fruit venu d'ailleurs devenu produit du terroir en Algérie* (available at http://www.huffpostmaghreb.com/2015/08/04/n_7932698.html).
- Humair, F., Humair, L., Kuhn, F. & Keuffer, C. 2015. E-commerce trade in invasive plants. *Conserv. Biol.*, 10.
- Hunt, D. 2006. *The new cactus lexicon*. Milborne Port, UK, DH books.
- Hunt, D. & Taylor, N.P. 1986. The genera of the Cactaceae: towards a new consensus. *Bradleya*, 4: 65–78.
- Indexmundi. 2015. *Precios de mercado* (available at <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=urea&meses=129>). Accessed 10 November 2015.
- INEGI (National Institute of Statistics and Geography). 2010. *Censo de población y vivienda 2010* (available at <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/accesomicrodatos/cpv2010>). Accessed 18 September 2015.
- Inglese, P. 1995. Orchard planting management. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology cultivation and uses of cactus pear*, pp. 78–91. Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Inglese, P. 2010. Cactus pear, *Opuntia ficus-indica* L. (Mill.) for fruit production: An overview. *Cactusnet Newsletter*, 12: 82–92.
- Inglese, P. & Barbera, G. 1993. Cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. Mill.) intensive production in Italy: an overview. In Proceedings of 4th Annual Texas Prickly Pear Council, 13–14 August, Kingsville, Texas, USA, pp. 13–23.
- Inglese, P., Barbera, G. & Carimi, F. 1994a. The effect of different amount of cladodes removal on reflowering of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L) Miller). *J. Hortic. Sci.*, 69: 61–65.
- Inglese, P., Israel, A.I. & Nobel, P.S. 1994b. Growth and CO₂ uptake for cladodes and fruit of the Crassulacean acid metabolism species *Opuntia ficus-indica* during fruit development. *Physiol. Plant.*, 91: 708–714.
- Inglese, P., Barbera, G., La Mantia, T. & Portolano, S. 1995a. Crop production, growth and ultimate fruit size of cactus pear following fruit thinning. *HortScience*, 30: 227–230.
- Inglese, P., Barbera, G. & La Mantia, T. 1995b. Research strategies for the improvement of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit quality and production. *J. Arid Environ.*, 29: 455–468.
- Inglese, P., Barbera, G. & La Mantia, T. 1997. Competitive growth of fruits and cladodes of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill and thermal time requirement. *Acta Hort.*, 438: 29–36.
- Inglese, P., La Mantia, T., Chessa, I. & Nielddu, G. 1998. Evolution of endogenous gibberellins at different stages of flowering in relation to return bloom of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. Mill.). *Sci. Hort.*, 73: 45–51.
- Inglese, P., Barbera, B. & La Mantia, T. 1999. Seasonal reproductive and vegetative growth patterns, and resource allocation during cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. fruit growth. *HortScience*, 34: 69–72.
- Inglese, P., Basile, F. & Schirra, M. 2002a. Cactus pear fruit production. In P.S. Nobel, ed. *Cacti: Biology and uses*, pp. 163–184. Berkeley, CA, USA, University of California Press.
- Inglese, P., Gugliuzza, G. & La Mantia, T. 2002b. Alternate bearing and summer pruning of cactus pear. *Acta Hort.*, 581: 201–204.
- Inglese, P., Gugliuzza, G. & Liguori, G. 2009. Fruit production of cultivated cacti: a short overview on plant ecophysiology and C budget. *Acta Hort.*, 811: 77–86.
- Inglese, P., Costanza, P., Gugliuzza, G., Inglese, G. & Liguori, G. 2010. Influence of within-tree and environmental factors on fruit quality of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) in Italy. *Fruits*, 65: 179–189.
- Inglese, P., Inglese, G. & Liguori, G. 2012. Fruit productivity and carbon gain of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. trees. *Isr. J. Plant Sci.*, 60(3): 283–90.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. *Climate change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. R.K. Pachauri & L.A. Meyer, eds. Geneva, Switzerland, IPCC. 151 pp.
- Jayakumar, R. & Kanthimathi, M.S. 2011. Inhibitory effects of fruit extracts on nitric oxide-induced proliferation in MCF-7 cells. *Food Chem.*, 126: 956–960.
- Jonas, A., Resenblat, G., Krapf, D., Bitterman, W. & Neeman, I. 1998. *Cactus flowers may prove beneficial in benign prostatic hiperplasia due to inhibition of 5 α reductase activity, aromatase activity and lipid peroxidation*.
- Jones, P.K., Holtkamp, R.H., Palmer, W.A. & Day, M.D. 2014. The host range of three biotypes of *Dactylopius tomentosus* (Lamarck) (Hemiptera: Dactylopiidae) and their potential as biological control agents of *Cylindropuntia* spp. (Cactaceae) in Australia. *Biocontrol Sci. Technol.*, 25(6): 613–628.
- Ju, J., Bai, H., Zheng, Y., Zhao, T., Fang, R. & Jiang, L. 2012. A multi-structural and multi-functional integrated fog collection system in cactus. *Nat Commun.*, 3: 1347.
- Julien, M.H. & Griffiths, M.W., eds. 1998. *Biological control of weeds. A world catalogue of agents and their target weeds*. 4th edition. Wallingford, UK, CAB International. 223 pp.
- Kang J., Park, J., Choi, S.H., Igawa, S. & Song, Y. 2012. *Opuntia humifusa* supplementation increased bone density by regulating parathyroid hormone and osteocalcin in male growing rats. *Int. J. Mol. Sci.*, 13: 6747–6756.
- Kang, J., Lee, J., Kwon, D. & Song, Y. 2013. Effect of *Opuntia humifusa* supplementation and acute exercise on insulin sensitivity and associations with PPAR- γ and PGC-1 α protein expression in skeletal muscle of rats. *Int. J. Mol. Sci.*, 14: 7140–7154.
- Karawya, M.S., Wassel, G.M., Baghdadi, H.H. & Ammar, N.M. 1980. Mucilages and pectins of *Opuntia*, *Tamarindus* and *Cydonia*. *Planta Med.*, [Suppl.]: 68–75.
- Karim, M.R., Felker, P. & Bingham, R.L. 1997. Correlations between cactus pear (*Opuntia* spp.) cladode nutrient concentrations and fruit yield and quality. *Ann. Arid Zone*, 37: 159–171.

- Kaufmann, J.C.** 2001. La Question des Raketa: Colonial struggles with prickly pear cactus in southern Madagascar, 1900–1913. *Ethnohistory*, 48(1–2): 7–120.
- Kaufmann, J.C.** 2004. Prickly pear cactus and pastoralism in southwest Madagascar. *Ethnology*, 43(4): 345–361.
- Keeley, J.E.** 1998. CAM photosynthesis in submerged aquatic plants. *Bot. Rev.*, 64(2): 121–175.
- Kiesling, R.** 1999a. Origen, domesticación y distribución de *Opuntia ficus-indica*. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 3: 50–59 (available at <http://www.jpacd.org>).
- Kiesling, R.** 1999b. Nuevos sinónimos en *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae). *Hickenia*, 2(66): 309–314.
- Kiesling, R.** 2013. Historia de la *Opuntia ficus-indica*. *Cactusnet Newsletter*, 13 [special issue]: 13–18.
- Kiesling, R., Larocca, J., Faúndez, L., Metzling, D. & Albesiano, S.** 2008. Cactaceae. In F.O. Zuloaga, O. Morrone & M. Belgrano, eds. *Catálogo de las plantas vasculares del cono Sur de América*, pp. 1715–1830. San Isidro, Argentina, Instituto Darwiniano, and St Louis, USA, Missouri Botanical Garden.
- Kim, W.G., Cho, W.D., Jee, H.J. & Hong, S.Y.** 2000. Occurrence of anthracnose on indian fig cactus caused by *Glomerella cingulata* and *Colletotrichum gloeosporioides*. *Plant Pathol. J.*, 16: 294–296.
- Kim, J.H., Park, S.M., Ha, H.J., Moon, C.J., Shin, T.K., Kim, J.M., Lee, N.H., Kim, H.C., Jang, K.J. & Wie, M.B.** 2006. *Opuntia ficus-indica* attenuates neuronal injury in vitro and in vivo models of cerebral ischemia. *J. Ethnopharmacol.*, 104: 257–262.
- Kim, H., Choi, H.K., Moon, J.Y., Kim, Y.S., Mosaddik, A. & Cho, S.K.** 2011. Comparative antioxidant and antiproliferative activities of red and white pitayas and their correlation with flavonoid and polyphenol content. *J. Food Sci.*, 76: C38–C45.
- Klein, H.** 1999. Biological control of three cactaceous weeds, *Pereskia aculeata* Miller, *Harrisia martinii* (Labouret) Britton and *Cereus jamacaru* De Candolle in South Africa. *Afr. Entomol. Mem.*, 1: 3–14.
- Klein, H.** 2011. A catalogue of the insects, mites and pathogens that have been used or rejected, or are under consideration for the biological control of invasive alien plants in South Africa. *Afr. Entomol.*, 19(2): 515–549.
- El Kossori, R.L., Villanume, C., El Boustani, E., Sauvare, Y. & Mejean, L.** 1998. Composition of pulp, skin and seeds of prickly pears fruit (*Opuntia ficus-indica* sp.). *Plant Foods Hum. Nutr.*, 52: 263–270.
- Kouba, M., Mhemdi, H. & Vorobiev, E.** 2015. Seed oil polyphenols: Rapid and sensitive extraction method and high resolution-mass spectrometry identification. *Anal. Biochem.*, 476: 91–93.
- Kull, C.A., Tassin, J., Moreau, S., Ramiarantsoa, H.R., Blanc Pamard, C. & Carrière, S.M.** 2012. The introduced flora of Madagascar. *Biological Invasions*, 14: 875–888.
- Kull, C.A., Tassin, J. & Carrière, M.** 2014. Approaching invasive species in Madagascar. *Madagascar Conserv. Dev.*, 9(2): 60–70.
- Kuti, J.O.** 1992. Growth and compositional changes during the development of prickly pear fruit. *J. Hortic. Sci.*, 67: 861–868.
- Kuti, J.O.** 2004. Antioxidant compounds from four *Opuntia* cactus pear varieties. *Food Chem.*, 85: 527–533.
- Kuti, J.O. & Galloway, C.M.** 1994. Sugar composition and invertase activity in prickly pear fruit. *J. Food Sci.*, 59: 387–388.
- Labib, S.** 1998. Planting cactus pear on raised beds versus planting on flat land. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 3: 1–3.
- Labra, M., Grassi, F., Bardini, M., Imazio, S., Guiggi, A., Citerio, S., Banfi, E. & Sgorbati, S.** 2003. Genetic relationships in *Opuntia* Mill. genus (Cactaceae) detected by molecular marker. *Plant Sci.*, 165: 1129–1136.
- Labuschagne, M.T. & Hugo, A.** 2010. Oil content and fatty acid composition of cactus pear seed compared with cotton and grape seed. *J. Food Biochem.*, 34: 93–100.
- Lafone Quevedo, S.A.** 1927. *Tesoro de catamarqueñismos*. Buenos Aires, Ed. Coni.
- Laguna, E., Deltoro, V.I., Ferrer, P.P., Novoa, A. & Guillot, D.** 2013. About binomen *Cylindropuntia rosea* (Cactaceae) and its invasive individuals recorded in the Valencian community (Spain). *Bouteloua*, 16: 40–51.
- Lakshminarayana, S. & Estrella, I.B.** 1978. Postharvest respiratory behavior of tuna (prickly pear) fruit (*Opuntia robusta* Mill.). *J. Hortic. Sci.*, 53: 327–330.
- La Mantia, T., Barbera, G. & Inglese, P.** 1997. Effect of cladode shading on growth and ripening of fruits of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. Miller). *J. Hortic. Sci.*, 72: 299–304.
- La Mantia, T., Barbera, G., Gugliuzza, G. & Inglese, P.** 1998. Interazione tra irrigazione ed entità di fruttificazione e qualità dei frutti di ficodindia (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). In *Atti Giornate Scientifiche SOL*, San Remo, Italy, pp. 241–242.
- Laurenz, J.C., Collier, C.C. & Kuti, J.O.** 2003. Hypoglycaemic effect of *Opuntia lindheimeri* Engelm. in a diabetic pig model. *Phytother. Res.*, 17: 26–29.
- Lee, E.B., Hyun, J.E., Li, D.W. & Moon, Y.I.** 2001. The effect of *Opuntia ficus-indica* var. saboten fruit on gastric lesion and ulcer in rats. *Nat. Prod. Sci.*, 7: 90–93.
- Lee, E.B., Hyun, J.E., Li, D.W. & Moon, Y.I.** 2002a. Effects of *Opuntia ficus-indica* var. Saboten stem on gastric damages in rats. *Arch. Pharmacol. Res.*, 25: 67–70.
- Lee, J.C., Kim, H.R., Kim, J. & Jang, Y.S.** 2002b. Antioxidant property of an ethanol extract of the stem of *Opuntia ficus-indica* var. Saboten. *J. Agric. Food Chem.*, 50: 6490–6496.
- Lee, J.A., Jung, B.G. & Lee, B.J.** 2012. Inhibitory effects of *Opuntia humifusa* on 7,12-dimethylbenz[*a*]anthracene and 12-O-tetradecanoylphorbol-13-acetate induced two-stage skin carcinogenesis. *Asian Pac. J. Cancer Prev.*, 13: 4655–4660.
- Leeper, G.W.** 1960. *The Australian environment*. Melbourne, Australia, Melbourne University Press. 151 pp.
- Le Houérou, H.N.** 1965. *Les cultures fourragères en Tunisie*. Document Technique No. 13. National Institute of Agronomical Research, Tunisia. 81 pp.
- Le Houérou, H.N.** 1984. Rain use efficiency a unifying concept in arid land ecology. *J. Arid Environ.*, 7: 213–247.
- Le Houérou, H.N.** 1989. An assessment of the economic feasibility of fodder shrubs plantations with particular reference to Africa. In *The biology and utilization of shrubs*, pp. 603–630. San Diego, CA, USA, Academic Press.
- Le Houérou, H.N.** 1991. Feeding shrubs to sheep in the Mediterranean arid zone: intake performance and feed value. In *Proceedings of the Fourth International Rangeland Congress CIRAD (SCIST)*, 22–26 April 1991, Montpellier, France. 1279 pp.
- Le Houérou, H.N.** 1992. The role of cacti in the agricultural development of Mediterranean arid zones. In *Proceedings of the Second International Cactus Pear and Cochineal Congress*, 22–25 September 1992, Santiago, Chile.
- Le Houérou, H.N.** 1994. *Drought-tolerant and water-efficient fodder shrubs (DTFS), their role as a “drought insurance” in the agricultural development of arid and semi-arid zones in southern Africa*. Report No. KV 65/94. Pretoria, Water Research Commission of South Africa. 139 pp.
- Le Houérou, H.N.** 1995. Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l’Afrique. Diversité biologique, développement durable et désertisation. *Options Méditerranéennes*, 10 [Serie B: Etudes et Recherches]. 396 pp.
- Le Houérou, H.N.** 1996a. The role of cacti (*Opuntia* spp.) in erosion control, land reclamation, rehabilitation and agricultural development in the Mediterranean Basin. *J. Arid Environ.*, 33: 135–159.
- Le Houérou, H.N.** 1996b. *Utilization of fodder trees and shrubs (TRUBS) in the arid and semi-arid zones of western Asia and northern Africa (WANA): history and perspectives*. A review. Hammamet, Tunisia, ICARDA/CIHEAM. 51 pp.
- Le Houérou, H.N.** 2002. Cacti (*Opuntia* spp.) as a fodder crop for marginal lands in the Mediterranean Basin. *Acta Hortic.*, 581: 21–46.
- Le Houérou, H.N., Correal, E. & Lailhacar, S.** 1991. New man-made agro-sylvo-pastoral production systems for the isoclimatic Mediterranean arid zone. In *Proceedings of the Fourth International Rangeland Congress*, Montpellier, France, pp. 383–388.
- Ledesma, N.R.** 2009. Our motherland was born with Santiago del Estero. In F. Rossi, ed. *Santiago del Estero—Argentina, History—Tradition—Culture*, pp. 9–20.
- Leuenberger, B.E.** 1988. Probleme der Taxonomie und Nomenklatur bei Nutzkakteen, insbesondere bei *Opuntia ficus-indica*, *O. streptacantha* und verwandten Taxa. Veröff. Lehre Angew. Forsch. *Weiterbildung*, 6: 55–72.
- Leuenberger, B.E.** 1991. Interpretation and typification of *Cactus ficus-indica* L. and *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller (Cactaceae). *Taxon*, 40: 621–627.
- Leuenberger, B.E. & Arroyo Leuenberger, S.** 2014. Northern hemisphere *Opuntia* and *Cylindropuntia* species (Cactaceae) naturalized in Argentina – and the riddle of *Opuntia penicilligera*. *Succ. Plant Res.*, 8: 95–112.
- Liguori, G. & Inglese, P.** 2015. Cactus pear (*O. ficus-indica* (L.) Mill.) fruit production: eco-physiology, orchard and fresh-cut management. *Acta Hortic.*, 1067: 247–252.
- Liguori, G., Di Miceli, C., Gugliuzza, G. & Inglese, P.** 2006. Physiological and technical aspects of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) double reflowering and out-of-season winter fruit cropping. *Int. J. Fruit Sci.*, 6: 23–34.
- Liguori, G., Inglese, G., Pernice, F., Sortino, G. & Inglese, P.** 2013a. CO₂ uptake of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. whole trees and single cladodes, in relation to plant water status and cladode age. *Ital. J. Agron.*, 8: 14–20.
- Liguori, G., Inglese, G., Pernice, F., Sibani, R. & Inglese, P.** 2013b. CO₂ fluxes of *Opuntia ficus-indica* Mill. trees in relation to water status. *Acta Hortic.*, 995: 125–132.

- Lila, Z.A., Mohammed, N., Tatsuoka, N., Kanda, S., Kurokawa, Y. & Itabashi, H. 2004. Effect of cyclodextrin diallyl maleate on methane production, ruminal fermentation and microbes *in vitro* and *in vivo*. *Anim. Sci. J.*, 75: 15–22.
- Lima, M.C.A., Araújo, P.E.S., Cavalcanti, M.F.M., Dantas, A.P., Santana, O.P. & Farias, I. 1974. Competição de espécies e de espaçamentos de palma forrageira. Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, Fortaleza, pp. 288–289.
- Lima, G.F.C., Rêgo, M.M.T., Aguiar, E.M., Silva, J.G.M., Dantas, F.D.G., Guedes, F.X. & Lôbo, R.N.B. 2015. Effect of different cutting intensities on morphological characteristics and productivity of irrigated Nopalea forage cactus. *Acta Hortic.*, 1067: 253–258.
- Lira Ortiz, A.L., Reséndiz Vega, F., Rios Leal, E., Contreras Esquivel, J.C., Chavarría Hernández, N., Vargas Torres, A. & Rodríguez Hernández, A.I. 2014. Pectins from waste of prickly pear fruits (*Opuntia albicarpa* Scheinvar): Chemical and rheological properties. *Food Hydrocolloids*, 37: 93–99.
- Llenderal, C. & Campos, F. 1999. Sistemas de producción de la grana cochinilla. In *Cria de 11a grana cochinilla del nopal para la producción de su pigmento*, pp. 61–67. Mexico, Postgraduate College.
- Lobell, D.B. & Gourdji, M.S. 2012. The influence of climate change on global crop productivity. *Plant Physiol.*, 160: 1686–1697.
- Lobos, E., Passos da Silva, D.M., Mena, J., Logarzo, G. & Varone, L. 2013. Principales plagas en *Opuntia*. *Cactus Newsletter*, 13 [Special issue]: 137–158.
- López Castañeda, J., Corrales García, J., Terrazas Salgado, T. & Colina León, T. 2010. Effect of saturated air treatments on weight loss reduction and epicuticular changes in six varieties of cactus pears fruit (*Opuntia* spp.). *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 12: 37–47.
- López Piñero, J.M., Fresquet Febrer, J.L., Lopez Terrada, M.L. & Pardo Tomas, J. 1992. *Medicinas, drogas y alimentos vegetales del nuevo mundo*. Madrid, Ministerio de Sanidad y Consumo.
- Lounsbury, C.P. 1915. Plant killing insects: the Indian cochineal. *Agric. J. Union S. Afr.*, 1: 537–543.
- Loza Cornejo, S. & Terrazas, T. 2003. Epidermal and hypodermal characteristics in North American Cactoideae (Cactaceae). *J. Plant Res.*, 116: 27–35.
- Lozano Gutierrez, J. & Espania Luna, M.P. 2008. Pathogenicity of *Beauveria bassiana* (Deuteromycotina: Hyphomycetes) against the white grub *Laniifera cyclades* (Lepidoptera: Pyralidae) under field and greenhouse conditions. *Fla. Entomol.*, 91(4): 664–668.
- Luna Paez, A., Valadez Moctezuma, E., Barrientos Priego, A.F. & Gallegos Vázquez, C. 2007. Characterization of *Opuntia* spp. by means of seed with RAPD and ISSR markers and its possible use for differentiation. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 9: 43–59.
- Luo, Y. & Nobel, P.S. 1993. Growth characteristics of newly initiated cladodes of *Opuntia ficus-indica* as affected by shading, drought and elevated CO₂. *Physiol. Plant.*, 87: 467–474.
- Madjdoub, H., Rousdeli, S. & Dertani, A. 2001a. Polysaccharides from prickly pear and nopal of *Opuntia ficus-indica*: extraction, characterization and polyelectrolyte behavior. *Polym. Int.*, 50: 552–560.
- Madjdoub, H., Roudesli, S., Picton, L., Le Cerf, D., Muller, G. & Grisel, M. 2001b. Prickly pear nopal pectin from *Opuntia ficus-indica*. Physicochemical study in dilute and semidilute solutions. *Carbohydr. Polym.*, 46: 69–79.
- Madruga Santillán, E., García Melo, F., Morales González, J.A., Vázquez Alvarado, P., Muñoz Juárez, S., Zuñiga Pérez, C., Sumaya Martínez, M.T., Madrigal Bujaidar, E. & Hernández Ceruelos, A. 2013. Antioxidant and anticlastogenic capacity of prickly pear juice. *Nutrients*, 5: 4145–4158.
- Mafra, R.C., Farias, I., Fernandes, A.P.M., Correia, E.B., Santana, O.P. & Wanderley, M.B. 1974. *Posição e número de artigos no plantio da palma Gigante* (*Opuntia ficus-indica*, Mill). Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia 9, Fortaleza, Brazil. 330 pp.
- Magallanes Quintanar, R., Valdez Cepeda, R.D., Blanco Macías, F., Márquez Madrid, M., Ruiz Garduño, R.R., Pérez Veyna, O., García Hernández, J.L., Murillo Amador, B., López Martínez, J.D. & Martínez Rubín de Celis, E. 2004. Compositional nutrient diagnosis in nopal (*Opuntia ficus-indica*). *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 6: 78–89.
- Magallanes Quintanar, R., Valdez Cepeda, R.D., Blanco Macías, F., Ruiz Garduño, R.R., Márquez Madrid, M., Macías Rodríguez, F.M., Murillo Amador, B., García Hernández, J.L. & Valdez Cepeda, R.D. 2006. Nutrient interactions in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) and their effect on biomass production. *Acta Hortic.*, 728: 145–150.
- Magnano di San Lio, G. & Tirrò, A. 1983. Una moria del fícidindia causada da *Armillaria mellea*. *Inf. Fitopatol.*, 1: 47–50.
- Majure, L.C., Puente, R. & Pinkava, D.J. 2012a. Miscellaneous chromosome numbers in Opuntieae DC. (Cactaceae) with a compilation of counts for the group. *Haseltonia*, 18: 67–78.
- Majure, L.C., Puente, R., Griffith, M.P., Judd, W.S., Soltis, P.S. & Soltis, D.E. 2012b. Phylogeny of *Opuntia* s.s. (Cactaceae): Clade delineation, geographic origins, and reticulate evolution. *Am. J. Bot.*, 99(5): 847–864.
- Majure, L.C., Judd, W.S., Soltis, P.S. & Soltis, D.E. 2012c. Cytogeography of the *Humifusa* clade of *Opuntia* s.s. Mill. 1754 (Cactaceae: Opuntioideae): Correlations with geographic distributions and morphological differentiation of a polyploid complex. *Comparative Cytogenetics*, 6: 53–77.
- Maki Díaz, G., Peña Valdivia, C.B., García Nava, R., Arévalo Galarza, L., Calderón Zavala, G. & Anaya Rosales, S. 2015. Physical and chemical characteristics of cactus stems (*Opuntia ficus-indica*) for exportation and domestic markets. *Agrociencia*, 49: 31–51.
- Malik, F.T., Clement, R.M., Gethin, D.T., Beysens, D., Cohen, R.E., Krawszik, W. & Parker, A.R. 2015. Dew harvesting efficiency of four species of cacti. *Bioinspir. Biomim.*, 10(3): 036005.
- Maltsberger, W.A. 1991. Feeding and supplementing prickly pear cactus to beef cattle. In Proceedings of the Second Annual Texas Prickly Pear Council, 16–17 August 1991, McAllen, Texas, USA, pp. 104–117.
- Mann, J. 1969. *Cactus-feeding insects and mites*. Bulletin 256. Washington, DC, United States National Museum. 158 pp.
- Mann, J. 1970. *Cacti naturalized in Australia and their control*. Queensland, Australia, Department of Lands. 128 pp.
- Margolis, E., Silva, A.B. & Jacques, F.O. 1985. Determinação dos fatores da Equação Universal de Perdas de Solo para as condições de Caruaru (PE). *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 9: 165–169.
- Marín, R. 1991. *Dactilopus coccus* (Costa), cochinilla de la tuna sobre *Opuntia ficus-indica*. *Quepo*, 5: 37–43.
- Marín, R., & Cisneros, F. 1977. Biología y morfología de la cochinilla del carmín, *Dactylopius coccus* Costa (Homoptera: Dactylopiidae). *Rev. Per. Entomol.*, 20(1): 115–120.
- Marsico, T.D., Wallace, L.E., Erwin, G.N., Brooks, C.P., McClure, J.E. & Welch, M.E. 2011. Geographic patterns of genetic diversity from the native range of *Cactoblastis cactorum* (Berg) support the document history of invasion and multiple introductions for invasive populations. *Biological Invasions*, 13: 857–868.
- Martin Belloso, O., Soliva Fortuny, R. & Oms Olliu, G. 2007. Fresh-cut fruits. In Y.H. Hui, ed. *Handbook of food products manufacturing*, pp. 879–970. Hoboken, New Jersey, USA, John Wiley & Sons, Inc.
- Matamala, P., Mora, M. & Sáenz, C. 2015. Evaluación de las preferencias de los consumidores en tunas de colores en dos estados de madurez. Faculty of Agronomic Sciences. University of Chile. Unpublished data.
- Mathenge, C.W., Holford, P., Hoffmann, J.H., Zimmermann, H.G., Spooner Hart, R. & Beattie, G.A.C. 2009. Distinguishing suitable biotypes of *Dactylopius tomentosus* (Hemiptera: Dactylopiidae) for biological control of *Cylindropuntia fulgida* var. *fulgida* (Caryophyllales: Cactaceae) in South Africa. *Bull. Entomol. Res.*, 99: 619–627.
- Matsushiro, B., Lillo, L., Sáenz, C., Urzúa, C. & Zárate, O. 2006. Chemical characterization of the mucilage from fruits of *Opuntia ficus indica*. *Carbohydr. Polym.*, 63: 263–267.
- Matthäus, B. & Özcan, M.M. 2011. Habitat effects on yield, fatty acid composition and tocopherol contents of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) seed oils. *Sci. Hortic.*, 131: 95–98.
- Mauseth, J.D. 1980. Release of whole cells of *Nopalea* (Cactaceae) into secretory canals. *Bot. Gaz.*, 141: 15–18.
- Mauseth, J.D. 1984. Effect of growth rate, morphogenic activity and phylogeny on shoot apical ultrastructure in *Opuntia polyacantha* (Cactaceae). *Am. J. Bot.*, 71: 1283–1292.
- Mauseth, J.D. 1989. Comparative structure-function studies within a single strongly dimorphic species, *Melocactus intortus* (Cactaceae). *Bradleya*, 7: 1–12.
- Mauseth, J.D. 1996. Comparative anatomy of tribes Cereeae and Browningieae (Cactaceae). *Bradleya*, 14: 66–81.
- Mauseth, J.D. 1999a. Anatomical adaptations to xeric conditions in *Maihuenia* (Cactaceae), a relictual, leaf-bearing cactus. *J. Plant Res.*, 112: 307–315.
- Mauseth, J.D. 1999b. Comparative anatomy of *Espositoa*, *Pseudoespositoa*, *Thrixanthocereus*, and *Vatricania* (Cactaceae). *Bradleya*, 17: 33–43.
- Mauseth, J.D. 2000. Theoretical aspects of surface-to-volume ratios and water-storage capacities of succulent shoots. *Am. J. Bot.*, 88: 1107–1115.
- Mauseth, J.D. 2004. Wide-band tracheids are present in almost all species of Cactaceae. *J. Plant Res.*, 117: 69–76.
- Mauseth, J.D. 2005. Anatomical features, other than wood, in subfamily Opuntioideae (Cactaceae). *Haseltonia*, 11: 2–14.

- Mauseth, J.D.** 2006a. Structure–function relationships in highly modified shoots of Cactaceae. *Ann. Bot.*, 98: 901–926.
- Mauseth, J.D.** 2006b. Wood in the cactus subfamily Opuntioideae has extremely diverse structure. *Bradleya*, 24: 93–106.
- Mauseth, J.D. & Kiesling, R.** 1997. Comparative anatomy of *Neoraimondia roseiflora* and *Neocardenasia herzogiana* (Cactaceae). *Haskelltonia*, 5: 37–50.
- Mauseth, J.D. & Ross, R.** 1988. Systematic anatomy of the primitive cereoid cactus *Lep-tocereus quadricostatus*. *Bradleya*, 6: 49–64.
- Mayorga, M.C., Urbiola, M.C., Suárez, R. & Escamilla, S.H.M.** 1990. Estudio agronómico de xoconostle *Opuntia* spp en la zona semiárida del Estado de Querétaro. En Memoria 3ª Reunión Nacional 1ª Reunión Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del nopal. Ed. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, Saltillo, Coahuila, Mexico.
- McConn, M. & Nakata, A.** 2004. Oxalate reduces calcium availability in the pads of prickly pear cactus through formation of calcium oxalate crystals. *J. Agric. Food Chem.*, 52: 1371–1374.
- McFadyen, R.E.** 1979. The cactus mealybug *Hypogeococcus festerianus* (Hem.: Pseudococcidae) an agent for the biological control of *Harrisia martinii* (Cactaceae) in Australia. *Entomophaga*, 24: 281–287.
- McFadyen, R.E. & Tomley, A.J.** 1981. Biological control of *Harrisia* cactus, *Eriocereus martinii*, in Queensland by the mealybug *Hypogeococcus festerianus*. In E.S. Delfosse, ed. Proceedings of the Fifth International Symposium on Biological Control of Weeds, pp. 589–594. Canberra, CSIRO.
- McLeod, M.G.** 1975. A new hybrid fleshy-fruited prickly-pear in California. *Madroño*, 23: 96–98.
- Meckes Lozoya, M. & Roman Rams, R.** 1986. *Opuntia streptacantha*, a coadjutor in the treatment of Diabetes mellitus. *Am. J. Chin. Med.*, 14: 116–118.
- Medeiros, G.R. de, Farias, J.J. de, Ramos, J.L.F. & Silva, D.S.** 1997. Efeito do espaçamento e da forma de plantio sobre a produção da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica*, Mill), no semi-árido. Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 34, Juiz de Fora, pp. 231–233.
- Medina Torres, L., Brito De La Fuente, F., Torrestiana Sanchez, B. & Katthain, R.** 2000. Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*). *Food Hydrocolloids*, 14: 417–424.
- Medina Torres, L., García Cruz, E.E., Calderas, F., González Laredo, R.F., Sánchez Olivares, G., Gallegos Infante, J.A., Rocha Guzmán, N.E. & Rodríguez Ramírez, J.** 2013. Microencapsulation by spray drying of gallic acid with nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*). *LWT – Food Sci. Technol.*, 50: 642–650.
- Mena Covarrubias, J.** 2011. Alternativas para el manejo integral de grana cochinilla, *Dactylopius opuntiae* Cockerell (Hemiptera: Dactylopiidae) en nopal tunero. In A.R.E. Vazquez, F. Blanco, M.R. Blanco & C. Valdez, eds. Memorias del X Simposium–Taller Nacional y III Internacional de Producción y Aprovechamiento del Nopal y Maguey, pp. 73–81. Campus de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Nuevo Leon, Escobedo, NL, Mexico. 300 pp.
- Mena Covarrubias, J.** 2012. Plagas de importancia económica para la producción de nopal en México. In F. Blanco Macías, R.E. Vázquez Alvarado, R.D. Valdez Cepeda & J.A. Santos Haliscak, eds. Memorias del XI Simposium–Taller Nacional y IV Internacional de Producción y Aprovechamiento del Nopal y Maguey, pp. 133–147. Campus de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Nuevo Leon. Escobedo, NL, Mexico. 236 pp.
- Mena Covarrubias, J.** 2013. Tecnologías de manejo integrado para los insectos plaga del nopal tunero en el Altiplano Mexicano. In C. Gallegos Vázquez, S. De J. Méndez Gallegos & C. Mondragón Jacobo, eds. *Producción sustentable de tuna en San Luis Potosí*, pp. 125–161. Colegio de Postgraduados – Fundación Produce San Luis Potosí. San Luis Potosí, Mexico.
- Mena Covarrubias, J.** 2014. Evaluación de los métodos para control de insectos plaga en nopal tunero en México. In F. Blanco Macías, R.E. Vázquez Alvarado, R.D. Valdez Cepeda & J.A. Santos Haliscak, eds. Memorias del XII Simposium–Taller Nacional y V Internacional de Producción y Aprovechamiento del Nopal y Maguey, pp. 79–86. Campus de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Nuevo Leon. Escobedo, NL, Mexico. 244 pp.
- Méndez Gallegos, S.J.** 1992. *Tasas de supervivencia y reproducción de la grana cochinilla Dactylopius coccus (Homoptera: Dactylopiidae) a diferentes temperaturas*. Montecillo, State of Mexico, Postgraduate College (MSc thesis). 70 pp.
- Méndez Gallegos, S.J.** 2013. De los montes a la biofábrica: La evolución de los sistemas de cría de la cochinilla. In L. Portillo & A.L. Viguera, eds. *Conocimiento y aprovechamiento de la grana cochinilla*, pp. 135–144. First edition. University of Guadalajara, Mexico.
- Méndez Gallegos, S.J. & Martínez Hernández, J. de J.** 1988. Efecto de la fertilización química y orgánica en tres formas de nopal (*Opuntia* spp), sobre el rendimiento, en una plantación comercial de ojalcaliente, Zatecas. En Memorias Reunión Nacional e Internacional Sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Universidad Autónoma Agraria, Saltillo, Mexico, pp. 127–144.
- Méndez Gallegos, S.J., García, H.J., Rössel, A., Tarango, A., Talavera, M. & Figueroa, B.** 2004. *Recomendaciones para el establecimiento de plantaciones de nopal en el Altiplano Potosino*. Coedición Colegio de Postgraduados. Comisión Nacional de las Zonas Áridas. 24 pp.
- Méndez Gallegos, S.J., Talavera Magaña, D. & García Herrera, E.J.** 2009. VII Simposium–Taller “Producción y aprovechamiento del nopal en el Noreste de México”. *Rev. Salud Pública Nutr.*, 2 [Edición Especial].
- Menezes, C.M.D.** 2008. *Effects of sun-dried Opuntia ficus-indica cladodes on digestive processes in sheep*. Bloemfontein, South Africa, University of the Free State (MSc dissertation).
- Menezes, C.M.D. da C., Schwalbach, L.M.J., Combrinck, W.J., Fair, M.D. & De Waal, H.O.** 2010. Effects of sun-dried *Opuntia ficus-indica* on feed and water intake and excretion of urine and faeces by Dorper sheep. *S. Afr. J. Anim. Sci.*, 40: 491–494.
- Menke, K.H. & Steingass, H.** 1988. Estimation of the energetic feed value from chemical analysis and in vitro gas production using rumen fluid. *Anim. Res. Dev.*, 28: 7–55.
- Merin, U., Gagel, S., Popel, G., Bernstein, S. & Rosenthal, I.** 1987. Thermal degradation kinetics of prickly-pear–fruit red pigment. *J. Food Sci.*, 52: 485–486.
- Metcalf, C.R. & Chalk, L.** 1979. *Anatomy of the dicotyledons. Part VII, Epicuticular wax and its morphology*. Vol. 1, 2nd ed, pp. 158–160. Oxford, UK, Clarendon Press.
- Middleton, K.** 1999. Who killed ‘Malagasy Cactus’? Science, environment and colonialism in southern Madagascar (1924–1930). *J. South. Afr. Stud.*, 25(2): 215–248.
- Migliore, G., Cembalo, L., Caracciolo, F. & Schifani, G.** 2012. Organic consumption and consumer participation in food community networks. *New Medit.*, 11(4) [suppl.]: 46–48.
- Migliore, G., Galati, A., Romeo, P., Crescimanno, M. & Schifani, G.** 2015a. Quality attributes of cactus pear fruit and their role in consumer choice. The case of Italian consumers. *Br. Food J.*, 117(6): 1637–1651.
- Migliore, G., Crescimanno, M., Schifani, G., Romeo, P. & Galati, A.** 2015b. Quality perception and consumer choice of cactus pear: Results of direct survey in Italy. Proceedings of the VIII International Congress on Cactus Pear and Cochineal. *Acta Hort.*, 1067: 275–282.
- Mimouni, A., Ait Lhaj, A. & Ghazi, M.** 2013. Mineral nutrition effect on cactus (*Opuntia ficus* spp.): growth and development. *Acta Hort.*, 995: 2013.
- Misra, A.K., Mishra, A.S., Tripathi, M.K., Chaturvedi, O.H., Vaithyanathan, S., Prasad, R. & Jakhmol, R.C.** 2006. Intake, digestion and microbial protein synthesis in sheep on hay supplemented with prickly pear cactus [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.] with or without groundnut meal. *Small Ruminant Res.*, 63: 125–134.
- Mohamed Yasheen, Y., Barringer, S.A. & Splittstoesser, W.E.** 1996. A note on the uses of *Opuntia* spp. in Central/North America. *J. Arid Environ.*, 32: 347–353.
- Mohammed, N., Lila, Z.A., Ajjaska, N., Hara, K., Mikuni, K., Kanda, S. & Itabashi, H.** 2004. Inhibition of ruminal microbial methane production by β -cyclodextrin iodopropane, malate and their combination *in vitro*. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.*, 88: 188–195.
- Mokoboki, K., Kgama T. & Mmbi, N.** 2009. Evaluation of cactus pear fruit quality at Mara ADC, South Africa. *Afr. J. Agric. Res.*, 4(1): 28–32.
- Mondragón Jacobo, C.** 1999. Low input agricultural systems based on cactus pear for subtropical semiarid environments. In J. Janick, ed. *Perspectives on new crops and new uses*, pp. 367–372. Alexandria, VA, USA, ASHS Press.
- Mondragón Jacobo, C.** 2001. Cactus pear domestication and breeding. *Plant Breed Rev.*, 20: 135–166.
- Mondragón Jacobo, C. & Bordelon, B.B.** 1996. Cactus pear (*Opuntia* spp. Cactaceae) breeding for fruit production. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 1: 19–35.
- Mondragón Jacobo, C. & Bordelón, B.** 2002. Presencia de apomixis en cruces de nopales mexicanos y su identificación molecular preliminar. *Rev. Fitotec. Mex.*, 25(3): 247–252.
- Mondragón Jacobo, C. & Chessa, I.** 2013. A global perspective on genetic resources of cactus pear: An asset for the future sustainability of semiarid lands. *Acta Hort.*, 995: 19–26.
- Mondragón Jacobo, C. & Doudareva, N.** 2000. DNA extraction from several cacti. *HortScience*, 35: 1124–1126.
- Mondragón Jacobo, C. & Pérez González, S.** 1994. ‘Reyna’ (syn. ‘Alfajayucan’) is the leading cactus pear cultivar in Central Mexico. *Fruit Var. J.*, 48: 134–136.
- Mondragón Jacobo, C. & Pérez González, S.** 1996. Native cultivars of cactus pear in Mexico. In J. Janick, ed. *Progress in new crops*, pp. 446–450. Arlington, VA, USA, ASHS Press.

- Mondragón Jacobo, C. & Pérez González, S.** 2001. *Cactus (Opuntia spp.) as forage*. FAO Plant Production and Protection Paper No. 169. Rome, FAO. 140 pp.
- Mondragón Jacobo, C. & Pimienta Barrios, E.** 1990. *Fertilización del nopal tunero*. Folleto Técnico No. 1. Campo Experimental Norte de Guanajuato. Guanajuato, Mexico, INIFAP.
- Mondragón Jacobo, C. & Pimienta Barrios, E.** 1995. Propagation. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 64–70. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Mondragón Jacobo, C. & Tegegne, F.** 2006. Cactus pear production systems in Tigray, Northern Ethiopia. *Acta Hortic.*, 728: 59–70.
- Mondragón Jacobo, C., Fernandez, M.R. & Estrada, C.H.** 1995. Ampliación de la época de cosecha de la tuna. In Pimienta Barrios *et al.*, eds. Proceedings of the Fifth National and Fourth International Cactus Pear Congress, Guadalajara, Mexico, pp. 265–295.
- Mondragón Jacobo, C., Gallegos Vazques, C. & Martínez González, J.C.** 2009. Cactus pear off-season production: a topic of interest for Mexican growers after market globalization. *Acta Hortic.*, 811: 409–414.
- Mondragón, J.C., Huerta, E.E. González Ch. M.M. & Mora, A.M.A.** 2012. *Propagación tecnificada del nopal para reducir incidencia de enfermedades y multiplicar nuevas variedades*. Folleto Técnico No. 8. Campo Experimental Bajío. Celaya, México, INIFAP.
- Monjauze, A. & Le Houérou, H.N.** 1965a. Le rôle des Opuntia dans l'économie agricole nord africaine. *Bull. Ecole Nat. Sup. Agric. Tunis*, 8–9: 85–165.
- Monjauze, A. & Le Houérou, H.N.** 1965b. *Les Opuntia dans l'économie agricole nord-africaine*. Rome, FAO. 92 pp.
- Monterroso Rivas, A.I., Conde Álvarez, C., Rosales Dorantes, G. & Gómez Díaz, J.D.** 2011. Assessing current and potential rainfed maize suitability under climate change scenarios in Mexico. *Atmosfera*, 24: 53–67.
- Montefiori, D.** 1990. *Ricerche sull'estrazione, la stabilità e l'impiego dei pigmenti del fico d'indiasanguigno*. Milan, Italy, University of Milan (thesis).
- Monteiro, C.C.F., Melo, A.A.S., Ferreira, M.A., Campos, J.M.S., Souza, J.S.R., Silva, E.T.S., Andrade, R.P.X. & Silva, E.C.** 2014. Replacement of wheat bran with spineless cactus (*Opuntia ficus indica* Mill cv Gigante) and urea in the diets of Holstein × Gyr heifers. *Trop. Anim. Health Prod.*, 46: 1149–1154
- Montiel, L.** 1995. *Morfología de Dactylopius coccus Costa (Homoptera: Dactylopiidae), y su biología y reproducción en dos fotoperiodos*. Mexico, Postgraduate College (MSc thesis). 106 pp.
- Mora, M., Espinoza, J., Schnettler, B. & Echeverría, G.** 2011. Perceived quality in fresh peaches: an approach through structural equation modeling. *Cienc. Invest. Agrar.*, 38(2): 179–190.
- Mora, M., Cortés, M., Sanhueza, C. & Sáenz C.** 2013. Innovation requirements for the development of cactus pear for export: a new item to be incorporated to the Chilean fruit export sector. Proceedings of the 7th International Congress on Cactus Pear and Cochineal. *Acta Hortic.*, 995: 229–236.
- Morales, M., Sáenz, C. & Robert, P.** 2009. Bioactive compounds in toppings from colored cactus pear cultivated in Chile. *Acta Hortic.*, 811: 127–130.
- Moran, V.C.** 1980. Interactions between phytophagous insects and their Opuntia hosts. *Ecol. Entomol.*, 5(2): 153–164.
- Moran, V.C. & Annecke, D.P.** 1979. Critical reviews of biological pest control in South Africa. 3. The jointed cactus, *Opuntia aurantiaca* Lindley. *J. Entomol. Soc. South. Afr.*, 42: 299–329.
- Moran, V.C. & Cabby, B.S.** 1979. On the life-history and fecundity of the cochineal insect, *Dactylopius austrinus* De Lotto (Homoptera: Dactylopiidae), a biological control agent for the cactus *Opuntia aurantiaca*. Commonwealth Agricultural Bureaux. *Bull. Entomol. Res.*, 69: 629–636.
- Moran, V.C. & Zimmermann, H.G.** 1984a. The biological control of cactus weeds of minor importance in South Africa. *Agric., Ecosyst. Environ.*, 37: 35–55.
- Moran, V.C. & Zimmermann, H.G.** 1984b. The biological control of cactus weeds: achievements and prospects. *Biocontrol News Inf.*, 5: 297–320.
- Moringo, M.A.** 1966. *Diccionario de Americanismos*. Buenos Aires, Mochnik Ed.
- El Moselhy, M.M., Sengupta, A.K. & Smith, R.** 2011. Carminic acid modified anion exchanger for the removal and preconcentration of Mo(VI) from wastewater. *J. Hazard. Mater.*, 185: 442–446.
- Mosshammer, M.R., Stintzing, F.C. & Carle, R.** 2006. Evaluation of different methods for the production of juice concentrates and fruit powders from cactus pear. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, 7: 275–287.
- El Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbab, M., Latruffe, N., Lizard, G., Nasser, B. & Cherkaoui Malki, M.** 2014. Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules*, 19: 14879–14901.
- Mottram, R.** 2013. Linnaean cactus legacy. *Cactician*, 3: 1–83.
- Mow, V.C., Gunn, B.H. & Walter, G.H.** 1982. Wind dispersal and settling of first-instar crawlers of the cochineal insect *Dactylopius austrinus* (Homoptera: Coccoidea: Dactylopiidae). *Ecol. Entomol.*, 7: 409–419.
- Mulas, M.** 1991. *Rooting experiments in one year old cladodes of Opuntia ficus-indica Mill.* International Symposium on Cactus Pear Fruit, Lagos de Morena, Jalisco, Mexico. 7 pp.
- Mulas, M.** 1992. Blossoming and fructification cycle of *Opuntia ficus-indica* Mill. in the Mediterranean environment. In Proceedings of the Second International Conference on Prickly Pear and Cochineal, 22–25 September, Santiago, Chile, pp. 53–60.
- Mulas, M.** 1997. Flower removal time and fruit quality in cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.). *Acta Hortic.*, 438: 123–128.
- Mulas, M. & D'Hallewin, G.** 1992. Improvement pruning and the effects on vegetative and yield behaviour in prickly pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.) cultivar 'Giulla'. *Acta Hortic.*, 296: 139–146.
- Mulas, M. & D'Hallewin, G.** 1997. Fruit quality of four cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.) cultivars as influenced by irrigation. *Acta Hortic.*, 438: 115–122.
- Mulas, M., D'Hallewin, G. & Canu, G.** 1992. Osservazioni sulla radicazione di cladode di anno di *Opuntia ficus-indica* Mill. *Frutticoltura*, 19: 67–70.
- Muñoz de Chávez, M., Chávez, A., Valles, V. & Roldán, J.A.** 1995. The Nopal: A plant of manifold qualities. *World Rev. Nutr. Diet.*, 77: 109–134.
- Nasr, Y.** 2015. Cactus pear in Jordan: current status, potential and opportunities. *Acta Hortic.*, 1067: 299–303.
- Nasr, Y. & Jamjoum, K.** 2002. The performance of *Opuntia ficus-indica* seedlings that resulted from different number of joint mature cladodes at two planting dates. *Acta Hortic.*, 581: 159–163.
- Nazareno, M.A.** 2014. Phytochemicals of nutraceutical importance from cactus and their role in human health. In D. Prakash & G. Sharma. *Phytochemicals of nutraceutical importance and their role in human health*, pp. 103–115. Oxford, UK, CAB.
- Ncibi, S., Ben Othman, M., Akacha, A., Kri-fi, M.N. & Zourgui, L.** 2008. *Opuntia ficus indica* extract protects against chlorpyrifos-induced damage on mice liver. *Food Chem. Toxicol.*, 46: 797–802.
- Nefzaoui, A.** 2009. Cactus: A crop to meet the challenges of climate change in dry areas. *Ann. Arid Zone*, 48: 1–18.
- Nefzaoui, A. & Ben Salem, H.** 2001. *Opuntia* – A strategic fodder and efficient tool to combat desertification in the WANA region. In C. Mondragón Jacobo & S. Pérez González, eds. *Cactus (Opuntia spp.) as forage*, pp. 73–90. FAO Plant Production and Protection Paper No. 169. Rome, FAO.
- Nefzaoui, A. & Ben Salem, H.** 2006. Cactus: un banco de alimentos para ganado en entornos áridos y semiáridos. *Cactusnet Newsletter*, 10 [Número Especial]: 41–57.
- Nefzaoui, A. & El Mourid, M.** 2008. Cash from cactus. *Appropriate Technol.*, 35: 18–20.
- Nefzaoui, A. & El Mourid, M.** 2009. Cacti: a key stone crop for the development in marginal lands and to combat desertification. *Acta Hortic.*, 811: 365–372.
- Nefzaoui, A. & El Mourid, M.** 2010. Cactus pear for soil and water conservation in arid and semi-arid lands. Improved utilization of cactus pear for food, feed, soil and water conservation and other products in Africa. *Cactusnet Newsletter*, 12 [Special Issue]. 224 pp.
- Nefzaoui, A., Ketata, H. & El Mourid, M.** 2011. Agricultural technological and institutional innovations for enhanced adaptation to environmental change in North Africa. In S.S. Young & S.E. Silvern, eds. *International perspectives on global environmental change*, pp. 57–84. InTech.
- Nefzaoui, A., Louhaichi, M. & Ben Salem, H.** 2014. Cactus as a tool to mitigate drought and to combat desertification. *J. Arid Land Stud.*, 24(1): 121–124.
- Negesse, T., Makkar, H.P.S. & Becker, K.** 2009. Nutritive value of some non-conventional feed resources of Ethiopia determined by chemical analyses and an in vitro gas method. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 154: 204–217.
- Nelson, E.A., Sage, T.L. & Sage, R.F.** 2005. Functional leaf anatomy of plants with Crasulacean acid metabolism. *Funct. Plant Biol.*, 32: 409–419.
- Nerd, A. & Mizrahi, Y.** 1992. Effect of fertilization on prickly pear production in Israel. In Proceedings of the Third Annual Texas Prickly Pear Council Meeting, Texas A&M University, Kingsville, Texas, USA, pp. 1–6.

- Nerd, A. & Mizrahi, Y.** 1993. Modern cultivation of prickly pear in Israel. *Acta Hort.*, 349: 235–237.
- Nerd, A. & Mizrahi, Y.** 1994. Effect of nitrogen fertilization and organ removal on rebudding in *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. *Sci. Hort.*, 59: 115–122.
- Nerd, A. & Mizrahi, Y.** 1995a. Effect of low winter temperatures on bud break in *Opuntia ficus-indica*. *Adv. Hort. Sci.*, 9: 1–4.
- Nerd, A. & Mizrahi, Y.** 1995b. Reproductive biology. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 49–57. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Nerd, A. & Mizrahi, Y.** 1997. Reproductive biology of cacti. *Hortic. Rev.*, 18: 321–346.
- Nerd, A. & Nobel, P.S.** 1991. Effects of drought on water relations and nonstructural carbohydrates in cladodes of *Opuntia ficus-indica*. *Physiol. Plant.*, 81: 495–500.
- Nerd, A. & Nobel, P.S.** 1995. Accumulation, partitioning and assimilation of nitrate in *Opuntia ficus-indica*. *J. Plant Nutr.*, 18: 2533–2549.
- Nerd, A., Karadi, A. & Mizrahi, Y.** 1989. Irrigation, fertilisation and polyethylene covers influence bud development in prickly pear. *HortScience*, 24: 773–775.
- Nerd, A., Karady, A. & Mizrahi, Y.** 1991a. Out of season prickly pear: fruit characteristics and effect of fertilization and short droughts on productivity. *HortScience*, 26: 337–342.
- Nerd, A., Karadi, A. & Mizrahi, Y.** 1991b. Out-of-season prickly pear: fruit characteristics and effect of fertilisation and short droughts on productivity. *J. Hort. Sci.*, 26: 527–529.
- Nerd, A., Karadi, A. & Mizrahi, Y.** 1991c. Salt tolerance of prickly pear cactus (*Opuntia ficus-indica*). *Plant Soil (Netherlands)*, 137: 201–207.
- Nerd, A., Mesika, R. & Mizrahi, Y.** 1993a. Effect of N fertilizer on autumn flush and cladode N in prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). *J. Arid Environ.*, 68: 337–342.
- Nerd, A., Mesika, R. & Mizrahi, Y.** 1993b. Effect of N fertiliser on autumn floral flush and cladode N in prickly pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. *J. Hort. Sci.*, 68: 545–550.
- Nerd, A., Tel Zur, N. & Mizrahi, Y.** 2002. Fruits of vine and columnar cacti. In P.S. Nobel, ed. *Cacti: Biology and uses*, pp. 185–198. Berkeley, CA, USA, University of California Press.
- Newbold, C.J., Lopez, S., Nelson, N., Ouda, J.O., Wallace, R.J. & Moss, A.R.** 2005. Proportionate precursors and other metabolic intermediates as possible alternative electron acceptors to methanogenesis in ruminal fermentation *in vitro*. *Br. Food J.*, 94: 27–35.
- Nieddu, G. & Spano D.** 1992. Flowering and fruit growth in *Opuntia ficus-indica*. *Acta Hort.*, 296: 153–159.
- Nobel, P.S.** 1982. Orientation, PAR interception and nocturnal acidity increases for terminal cladodes of a widely cultivated cactus *Opuntia ficus-indica*. *Am. J. Bot.*, 69: 1462–1469.
- Nobel, P.S.** 1983. Nutrient levels in cacti: relation to nocturnal acid accumulation and growth. *Am. J. Bot.*, 70: 1244–1253.
- Nobel, P.S.** 1988. *Environmental biology of agaves and cacti*. Cambridge, NY, USA, Cambridge University Press. 270 pp.
- Nobel, P.S.** 1991. Tansley Review No. 32. Achievable productivities of certain CAM plants: basis for high values compared with C 3 and C 4 plants. *New Phytol.*, 119: 183–205.
- Nobel, P.S.** 1994. *Remarkable agaves and cacti*. New York, USA, Oxford University Press. 180 pp.
- Nobel, P.S.** 1995. Environmental biology. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 36–48. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Nobel, P.S.** 1998. *Los incomparables agaves y cactus*. Mexico, Editorial Trillas. 211 pp.
- Nobel, P.S.** 2001. Ecophysiology of *Opuntia ficus-indica*. In C. Mondragón Jacobo & S. Pérez González, eds. *Cactus (Opuntia spp.) as forage*, pp. 13–19. FAO Plant Production and Protection Paper No. 169. Rome, FAO.
- Nobel, P.S.** 2002. Cactus physiological ecology, emphasizing gas exchange of *Platyopuntias* fruit. *Acta Hort.*, 58: 143–150.
- Nobel, P.S., ed.** 2002. *Cacti: Biology and uses*. Berkeley, CA, USA, University of California Press. 280 pp.
- Nobel, P.S.** 2006. Parenchyma-chlorenchyma water movement during drought for the hemiepiphytic cactus *Hylcoereus undatus*. *Ann. Bot.*, 97: 469–474.
- Nobel, P.S.** 2009. *Desert wisdom, agaves and cacti, CO₂ water, climate change*. New York, USA, iUniverse. 198 pp.
- Nobel, P.S. & Bobich, E.G.** 2002. Environmental biology. In P.S. Nobel, ed. *Cacti: Biology and uses*, pp. 57–74. Berkeley, CA, USA, University of California Press.
- Nobel, P.S. & Castaneda, M.** 1998. Seasonal light and temperature influences on organ initiation for unrooted cladodes of prickly pear cactus *Opuntia ficus-indica*. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 123: 47–51.
- Nobel, P.S. & De la Barrera, E.** 2003. Tolerances and acclimation to low and high temperatures for cladodes, fruits and roots of a widely cultivated cactus, *Opuntia ficus-indica*. *New Phytol.*, 157: 271–279.
- Nobel, P.S. & De la Barrera, E.** 2004. CO₂ uptake by the cultivated hemiepiphytic cactus, *Hylcoereus undatus*. *Ann. Appl. Biol.*, 144: 1–8.
- Nobel, P.S. & García de Cortázar, V.** 1991. Growth and predicted productivity of *Opuntia ficus-indica* for current and elevated carbon dioxide. *Agron. J.*, 83: 224–230.
- Nobel, P.S. & Hartsock, T.L.** 1983. Relationships between photosynthetically active radiation, nocturnal acid accumulation, and CO₂ uptake for a crassulacean acid metabolism plant, *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiol.*, 71: 71–75.
- Nobel, P.S. & Hartsock, T.L.** 1984. Physiological responses of *Opuntia ficus-indica* to growth temperature. *Physiol. Plant.*, 60: 98–105.
- Nobel, P.S. & Israel, A.A.** 1994. Cladode development, environmental responses of CO₂ uptake, and productivity for *Opuntia ficus-indica* under elevated CO₂. *J. Exp. Bot.*, 45: 295–303.
- Nobel, P.S., Geller, G.N., Kee, S.C. & Zimmerman, A.D.** 1986. Temperatures and thermal tolerance for cacti exposed to high temperatures near the soil surface. *Plant Cell Env.*, 9: 279–287.
- Nobel, P.S., Russel, C.E., Felker, P., Medina, J.G. & Acunã, E.** 1987. Nutrient relations and productivity of prickly pear cacti. *Agron. J.*, 79(3): 550–555.
- Nobel, P.S., Cavalièr, J. & Andrade, J.L.** 1992. Mucilage in cacti: its apoplastic capacitance, associated solutes, and influence on tissue water relations. *J. Exp. Bot.*, 43(250): 641–648.
- Nobel, P.S., De la Barrera, E., Beilman, D.W., Doherty, J.H. & Zutta, B.R.** 2002. Temperature limitations for cultivation of edible cacti in California. *Madroño*, 49: 228–236.
- North, G.B. & Nobel, P.S.** 1992. Drought-induced changes in hydraulic conductivity and structure in roots of *Ferocactus acanthodes* and *Opuntia ficus-indica*. *New Phytol.*, 120: 9–19.
- North, G.B., Huang, B. & Nobel, P.S.** 1993. Changes in structure and hydraulic conductivity for root junctions of desert succulents as soil water status varies. *Bot. Acta*, 106: 126–135.
- North, G.B., Moore, T.L. & Nobel, P.S.** 1995. Cladode development for *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae) under current and doubled CO₂ concentrations. *Am. J. Bot.*, 82: 159–166.
- Northcutt, G.** 2001. *Some downwind costs of upwind erosion* (available at http://72.3.251.71/EC/Editorial/Some_Downwind_Costs_of_Upwind_Erosion_4833.aspx).
- Novoa, S.** 2006. Sobre el origen de la tuna en el Perú. Algunos alcances. *Zonas Áridas*, 10: 174–181.
- Novoa, A., Le Roux, J.J., Robertson, M.P., Wilson, J.R.U. & Richardson, D.M.** 2014. Introduced and invasive cactus species: a global review. *AoB Plants*, 1–14.
- Novoa, A., Rodriguez, J., López Nogueira, A., Richardson, D.M. & González, L.** 2016. Seed characteristics in Cactaceae: useful diagnostic features for screening species for invasiveness. *S. Afr. J. Bot.*, 105: 61–65. DOI: 10.1016/j.sajb.2016.01.003.
- Obón, J., Castellar, M., Alacid, M. & Fernández López, J.** 2009. Production of a red-purple food colorant from *Opuntia stricta* fruits by spray drying and its application in food model systems. *J. Food Eng.*, 90: 471–479.
- Ochoa, M.J.** 2003. Cactus pear (*Opuntia* spp.) varieties: main characteristics in Republic Argentina. *Cactusnet Newsletter* (July 2003). 31 pp.
- Ochoa, M.J.** 2006. Manejo de los tunales hacia un sistema de aprovechamiento integral. Aprovechamiento integral de la tuna. *Cactusnet Newsletter*, 10 [Número Especial]: 64–72.
- Ochoa, J.** 2008. Cactus pear (*Opuntia* spp.) varieties: main characteristics of Republica Argentina. *Cactusnet Newsletter*, 8. 32 pp.
- Ochoa, M.J. & Uhart, S.A.** 2006a. Nitrogen availability and fruit yield generation in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*): I. Effects on cladode area and crop solar radiation interception. *Acta Hort.*, 728: 117–123.
- Ochoa, M.J. & Uhart, S.A.** 2006b. Nitrogen availability and fruit yield generation in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*): II. Effects on solar radiation use efficiency and dry matter accumulation. *Acta Hort.*, 728: 125–130.
- Ochoa, M.J. & Uhart, S.A.** 2006c. Nitrogen availability and fruit yield generation in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*): III. Effects on fruit yield and dry matter allocation to reproductive sinks. *Acta Hort.*, 728: 131–136.
- Ochoa, M.J. & Uhart, S.A.** 2006d. Nitrogen availability and fruit yield generation in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*): IV. Effects on fruit quality. *Acta Hort.*, 728: 137–144.
- Ochoa, M.J., Leguizamón, G. & Uhart, S.A.** 2002. Effects of nitrogen availability on cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. Mill.) postharvest quality. *Acta Hort.*, 581: 225–230.
- Ochoa, M.J., Targa, M.G., Abdala, G. & Leguizamón, G.** 2009. Extending fruiting season of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) in Santiago del Estero, Argentina. *Acta Hort.*, 811: 87–90.

- Ochoa, M.J., Lobos, E., Portillo, L. & Viguera, A.L. 2015a. Importance of biotic factors and impact on cactus pear production system. *Acta Hortic.*, 1067: 327–334.
- Ochoa, M.J., Rivera, L.A., Arteaga Garibay, R.I., Martínez Peña, M.D., Ireta, J. & Portillo, L. 2015b. Black spot caused by *Pseudocercospora opuntiae* in cactus pear productive systems of Jalisco, Mexico. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 17: 1–12.
- Ochoa Velasco, C.E. & Guerrero Beltrán, J. . 2014. Postharvest quality of peeled prickly pear fruit treated with acetic acid and chitosan. *Postharvest Biol. Technol.*, 92: 139–145.
- ODEPA (Office of Agricultural Studies and Policies). 2015a. *Precios* (available at <http://www.odepa.cl/precios>).
- ODEPA. 2015b. *Comercio exterior* (available at <http://www.odepa.cl/estadisticas/comercio-exterior/>).
- ODEPA-CIREN (Natural Resources Centre). 2013. *Catastro de superficie frutícola regional: Maule* (available at <http://www.odepa.cl/catastros-de-superficie-fruticola-regional/>).
- ODEPA-CIREN. 2014. *Catastro de superficie frutícola regional: Región Metropolitana* (available at <http://www.odepa.cl/catastros-de-superficie-fruticola-regional/>).
- ODEPA-CIREN. 2015a. *Catastro de superficie frutícola regional: Atacama* (available at <http://www.odepa.cl/catastros-de-superficie-fruticola-regional/>).
- ODEPA-CIREN. 2015b. *Catastro de superficie frutícola regional: Coquimbo* (available at <http://www.odepa.cl/catastros-de-superficie-fruticola-regional/>).
- ODEPA-CIREN. 2015c. *Catastro de superficie frutícola regional: O'Higgins* (available at <http://www.odepa.cl/catastros-de-superficie-fruticola-regional/>).
- Odoux, E. & Domínguez López, A. 1996. Le figuier de barbarie: une source industrielle de betalaines? *Fruits*, 51(1): 61–78.
- Oelofse, R.M., Labuschagne, M. & Potgieter, J.P. 2006. Plant and fruit characteristics of cactus pear (*Opuntia* spp.) cultivars in South Africa. *J. Sci. Food Agric.*, 86: 1921–1925.
- OEP (Office of Livestock and Pasture). 2016. *Stratégie nationale d'amélioration pastorale*. Tunisia, Ministry of Agriculture.
- Oh, P.H. & Lim, K.T. 2006. Glycoprotein (90kCa) isolated from *Opuntia ficus-indica* var. Saboten Makino lowers plasma lipid level through scavenging of intracellular radicals in triton WR-1339-induced mice. *Biol. Pharm. Bull.*, 29: 1391–1396.
- Oliveira, E.P., Cavalcanti, V.A.L.B. & Coelho R.S.B. 2003. Ocorrência de *Macrophomina phaseolina* em palma forrageira no semiárido de Pernambuco. *Fitopatol. Bras.*, 26 [Suplemento]: 221.
- Oliveira, V.S., Ferreira, M.A., Guim, A., Modesto, E.C., Arnaud, B.L. & Silva, F.M. 2007. Effects of replacing corn and Tifton hay with forage cactus on milk production and composition of lactating dairy cows. *Rev. Bras. Zootec.*, 36(4): 928–935.
- Oliveri, C., Campisano, A., Catara, A. & Cirvilleri, G. 2007. Characterization and fAFLP genotyping of *Penicillium* strains from post-harvest samples and packinghouse environments. *J. Plant Pathol.*, 89: 29–40.
- Olson, J.C. & Jacoby, J. 1972. Cue utilization in the quality perception process. In M. Venkatesan, ed. Proceedings of the Third Annual Conference of the Association for Consumer Research, Chicago, pp. 167–179.
- Orona Castillo, I., Flores Hernández, A., Rivera González, M., Martínez, G. & Espinosa Arellano, J.J. 2003. Productividad del agua en el cultivo de nopal con riego por goteo en la Comarca Lagunera. *Terra Latinoamericana*, 21(2): 195–201.
- Osada, K.S. & Cárcamo, R.A. 1991. *Etiología de la mancha negra del nopal*. Memorias de Resúmenes, Congreso Nacional de Fitopatología. Sociedad Mexicana de Fitopatología, Mexico. 28 pp.
- Osmond, C.B., Nott, D.L. & Firth, P.M. 1979. Carbon assimilation patterns and growth of the introduced CAM plant *Opuntia inermis* in Eastern Australia. *Oecologia*, 40: 331–350.
- Osmond, B., Neales, T. & Stange, G. 2008. Curiosity and context revisited: crassulacean acid metabolism in the Anthropocene. *J. Exp. Bot.*, 59(7): 1489–1502.
- Otálora, M.C., Carriazo, J.G., Iturriaga, L., Nazareno, M.A. & Osorio, C. 2015. Microencapsulation of betalains obtained from cactus fruit (*Opuntia ficus-indica*) by spray drying using cactus cladode mucilage and maltodextrin as encapsulating agents. *Food Chem.*, 187: 174–181.
- Ouerghemmi, I., Bourgo, S., Mejri, H., Marzouk, B. & Saidini Tounsi, M. 2013. Study of essential and fixative oil chemical composition extracted from *Opuntia ficus-indica* seeds grown in Tunisia and its antioxidant activity. *Riv. Ital. Sostanze Grasse*, 90: 21–30.
- Ouled Belgacem, A. & Louhaichi, M. 2013. The vulnerability of native rangeland plant species to global climate change in the West Asia and North African regions. *Clim. Change*, 119: 451–463.
- Ovalle Rivera, O., Läderach, P., Bunn, C., Obersteiner, M. & Schroth, G. 2015. Projected shifts in *Coffea Arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. *PLoS One*, 10: e0124155.
- Özcan, M. & Al Juhaimi, F. 2011. Nutritive value and chemical composition of prickly pear seed (*Opuntia ficus-indica* L.) growing in Turkey. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, 62(5): 533–536.
- Padilla, F.M. & Pugnaire, F.I. 2006. The role of nurse plants in the restoration of degraded environments. *Front Ecol. Environ.*, 4: 196–202.
- Palma, A., Schirra, M., D'Aquino, S., La Malfa, S. & Continella, A. 2015. Effect of edible coating on ascorbic acid, betalains, organic acids, sugar, polyphenol content and antioxidant activity in minimally processed cactus pears (*Opuntia ficus-indica*). *Acta Hortic.*, 1067: 127–133.
- Palomares Perez, M. 2011. *La chinche roja Hesperolobops nigriceps Reuter (Hemiptera: Miridae), y su relación con el "cacarizo del nopal", en Milpa Alta, Ciudad de México*. Montecillo, Texcoco, Mexico State, Postgraduate College (Doctorate thesis). 86 pp.
- Palomino, G. & Heras, H.M. 2001. Karyotypic studies in *Opuntia cochineria*, *O. hyptiacantha*, and *O. streptacantha* (Cactaceae). *Caryologia*, 54: 147–154.
- Pannitteri, C., Scuderi, G., Continella, A., La Malfa, S., D'Aquino, S. & Palma, A. 2015. Effectiveness of technological treatments for shelf-life extension of ready-to-eat cactus pear fruits. *Acta Hortic.*, 1067: 97–102.
- Pareek, O.P., Singh, R.S. & Vashishtha, B.B. 2003. Performance of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill) clones in hot arid region of India. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 5: 121–130.
- Parish, J. & Felker, P. 1997. Fruit quality and production of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones selected for increased frost hardiness. *J. Arid Environ.*, 37: 123–143.
- Passioura, J.B. 1988. Water transport in and to roots. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 39: 245–256.
- Paterson, I.D., Hoffmann, J.H., Klein, H., Mathenge, C.W., Neso, S. & Zimmermann, H.G. 2011. Biological Control of Cactaceae in South Africa. *Afr. Entomol.*, 19(2): 230–246.
- Pemberton, R.W. 1995. *Cactoblastis cactorum* (Lepidoptera: Pyralidae) in the United States. An immigrant biological control agent or an introduction of the nursery industry? *Am. Entomol.*, 41: 230–232.
- Pensabén, E.M., Ramírez C., M.A. & Herrera, A. 1995. Efecto del tiempo de precocido y del tipo de solución empleada para la eliminación de las pectinas hidrosolubles contenidas en el nopal (*Opuntia leucotricha* De Candolle). In E. Pimienta Barrios, C. Neri Luna, A. Muñoz Urias & F.M. Huerta Martínez. *Conocimiento y aprovechamiento del nopal*, pp. 16–18. Memorias del 6to. Congreso Nacional y 4to. Congreso Internacional, Universidad de Guadalajara, Jalisco, México.
- Pérez, M.R., Rodríguez, M. & Martínez, M.C. 1999. Elaboración de vinagre de tuna amarilla "Naranjona o Pico Chulo". En Memoria VIII Congreso Nacional y VI Internacional sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, 6–10 September, San Luis Potosí, Mexico, pp. 68–69.
- Petty, F.W. 1948. *The biological control of prickly pear in South Africa*. Science Bulletin No. 271. Department of Agriculture of the Union of South Africa. 163 pp.
- Pettinari, C. 1951. Una fusariosi su radici di *Opuntia ficus-indica*. *Boll. Stn. Patol. Veg.*, 61–67.
- Piga, A. 2004. Cactus Pear: A fruit of nutraceutical and functional importance. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 6: 9–22.
- Piga, A., D'Aquino, S., Agabbio, M. & Schirra, M. 1996. Storage life and quality attributes of cactus pears cv 'Gialla' as affected by packaging. *Agr. Med.*, 126: 423–427.
- Piga, A., D'Hallewin, G., D'Aquino, S. & Agabbio, M. 1997. Influence of film wrapping and UV irradiation on cactus pear quality after storage. *Packag. Technol. Sci.*, 10: 59–68.
- Piga, A., D'Aquino, S., Agabbio, M., Emonti, G. & Farris, G.A. 2000. Influence of storage temperature on shelf-life of minimally processed cactus pear fruit. *Lebensm.-Wiss. Technol.*, 33: 15–20.
- Pimentel González, D.J. 2013. Manejo poscosecha del nopal. In *Tecnología poscosecha y efectos biofuncionales del nopal y la tuna*, pp. 87–114. Mexico, Ed. Trillas.
- Pimienta Barrios, E. 1986. *Establecimiento y manejo de plantaciones de nopal tunero en Zacatecas*. Campo Agrícola Experimental Zacatecas Publicación Especial 5. INIFAP, SARH.
- Pimienta Barrios, E. 1990. *El nopal tunero*. Mexico, Universidad de Guadalajara. 246 pp.
- Pimienta Barrios, E. 1994. Prickly pear (*Opuntia* spp.): a valuable fruit crop for the semiarid lands of Mexico. *J. Arid Environ.*, 28: 1–11.
- Pimienta Barrios, E. & Engleman, E.M. 1985. Desarrollo de la pulpa y proporción, en volumen de los componentes del lóculo maduro en tuna (*Opuntia ficus indica* (L.) Miller). *Agrociencia*, 62: 51–56.
- Pimienta Barrios, E. & Mauricio, L. 1989. Variación en componentes del frutomaduro en transformas de nopal (*Opuntia* spp.) tunero. *Rev. Fitotec. Mex.*, 12: 183–196.

- Pimienta Barrios, E. & Munoz Urias, A.** 2002. Domestication of Opuntias and cultivated varieties. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 58–63. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Pimienta Barrios, E., Zañudo, J., Yezpe, E., Pimienta Barrios, E. & Nobel, P.S.** 2000. Seasonal variation of net CO₂ uptake for cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) and pitayo (*Stenocereus queretaroensis*) in a semi-arid environment. *J. Arid Environ.*, 44: 73–83.
- Pimienta Barrios, E., Zañudo Hernández, J. & Nobel, P.S.** 2005. Effects of young cladodes on the gas exchange of basal cladodes of *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae) under wet and dry conditions. *Int. J. Plant Sci.*, 166: 961–968.
- Pimienta Barrios, E., Castillo Cruz, I., Zañudo Hernández, J., Méndez Morán, L. & Nobel, P.S.** 2007. Effects of shade, drought and daughter cladodes on the CO₂ uptake by cladodes of *Opuntia ficus-indica*. *Ann. Appl. Biol.*, 151: 137–144.
- Piña, I.** 1977. *La grana o cochinilla del nopal*. Monografías LANFL. No. 1. Mexico, D.F. 54 pp.
- Piña, I. L.** 1981. Observaciones sobre la grana y sus nopales hospederos en el Perú. *Cact. Succulentas Mex.*, 26(1): 10–15.
- Pinkava, D.J.** 2002. Chromosome numbers of the continental North American Opuntioideae (Cactaceae). *Succ. Plant Res.*, 6: 78–98.
- Pinkava, D.J. & Parfitt, B.D.** 1982. Chromosome numbers in some cacti of North America IV. *Bull. Torrey Bot. Club*, 109: 121–128.
- Pinkava, D.J., McLeod, M.G., McGill, L.A. & Brown, R.C.** 1973. Chromosome numbers in some cacti of Western North America II. *Brittonia*, 25: 2–9.
- Pinkava, D.J., Baker, M.A., Parfitt, B.D., Mohlenbrock, M.W. & Worthington, R.D.** 1985. Chromosome numbers in some cacti of North America V. *Syst. Bot.*, 10: 471–483.
- Pinkava, D.J., Parfitt, B.D., Baker, M.A. & Worthington, R.D.** 1992. Chromosome numbers in some cacti of North America VI, with nomenclatural changes. *Madroño*, 39: 98–113.
- Pinos Rodríguez, J.M., Velázquez, J.C., González, S.S., Aguirre, J.R., García, J.C., Álvarez, G. & Jasso, Y.** 2010. Effects of cladode age on biomass yield and nutritional value of intensively produced spineless cactus for ruminants. *S. Afr. J. Anim. Sci.*, 40: 245–250.
- Pitalua, A., Jiménez, E., Vernon Carter, C. & Beristain, C.** 2010. Antioxidative activity of microcapsules with beetroot juice using gum Arabic as wall material. *Food Bioprod. Process.*, 88: 253–258.
- Plueneke, R.H.** 1990. Prickly work at the R.W. Williams Ranch in Dimmit County Texas in the 1960s. In Proceedings of the First Annual Texas Prickly Pear Council, Kingsville, Texas, USA, pp. 22–26.
- Portillo, L.** 2005. Origen de *Dactylopius coccus* Costa (Hemiptera: Dactylopiidae): ¿Norte o Sudamérica? *Dugesiana*, 12: 1–8.
- Portillo, L.** 2009. Biogeography of Dactylopiidae and human factor. *Acta Hortic.*, 811: 235–240.
- Portillo, L. & Viguera, A.L.** 2003. *Cría de grana cochinilla*. Litográfica Montes. Mexico, University of Guadalajara. 51 pp.
- Portillo, L., Viguera, A.L. & Zamarripa, F.** 1992. El método Ricci: Una nueva técnica de infestación para la coccidocultura. En Memorias de Resúmenes 5º Congreso Nacional y 3º Internacional Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Chapingo, Mexico, pp. 77–78.
- Potgieter, J.P.** 1997a. Seasonal guide for the cultivation of spineless cactus pear for fruit production. *Cactus Pear News*, Sept.: 4.
- Potgieter, J.P.** 1997b. Belangrike eienskappe van aanbevole turksvyvarieteite. *Cactus Pear News*, Nov.: 6–8.
- Potgieter, J.P.** 2001. *Guidelines for the cultivation of cactus pears for fruit production*. Fourth Revised Edition. Sinoville, South Africa, Group 7 Trust Printers. 16 pp.
- Potgieter, J.P.** 2007. *The influence of environmental factors on spineless cactus pear (Opuntia spp.) fruit yield in Limpopo Province, South Africa*. Bloemfontein, South Africa, University of the Free State (MSc thesis). 120 pp.
- Potgieter, J.P. & Mashope, B.K.** 2009. Cactus pear (*Opuntia* spp.) germplasm conservation in South Africa. *Acta Hortic.*, 811: 47–54.
- Potgieter, J.P. & Mkhari, J.J.** 2000. Effects of N,P,K and lime application on cactus pear (*Opuntia* spp.) fruit yield and quality under rain fed conditions in South Africa. Abstract Fourth International Congress on Cactus Pear and Cochineal, Hammamet, Tunisia. 37 pp.
- Potgieter, J.P. & Smith, M.** 2006. Genotype × environment interaction in cactus pear (*Opuntia* spp.), additive main effects and multiplicative interaction analysis for fruit yield. *Acta Hortic.*, 728: 97–104.
- Prakash, D. & Gupta, K.R.** 2009. The antioxidant phytochemicals of nutraceutical importance. *Open Nutraceuticals J.*, 2: 20–35.
- Pretorius, C.C., Rethman, N.F.G. & Wessels, A.B.** 1997. Invloed van besproeiingspeil op die opbrengs en voedingswaarde van die kultivars *Opuntia ficus-indica* as veevoer. *Appl. Plant Sci.*, 11: 53–55.
- Prieto, C., Sáenz, C., Silva, P. & Loyola, E.** 2009. Balsamic type vinegar from coloured ecotypes of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). *Acta Hortic.*, 811: 123–126.
- Quezada Salinas, J., Sandoval Islas, S., Alvarado Rosales, D. & Cardenas Soriano, E.** 2006. Etiología de la mancha negra del nopal (*Opuntia ficus-indica* Mill) en Tlanepantla, Morelos, Mexico. *Agrociencia*, 40: 641–653.
- Quispe, L.** 1983. Métodos de infestación artificial de la cochinilla del carmin *Dactylopius coccus* Costa. En I Seminario Departamental de Producción y Fomento de la Tuna y Cochinilla. Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga, pp. 68–70.
- Al Qurashi, A.D. & Awad, M.A.** 2012. Postharvest salicylic acid treatment reduces chilling injury of 'Taify' cactus pear fruit during cold storage. *J. Food, Agric. Environ.*, 10: 120–124.
- Raabe, R.D. & Alcon, S.M.** 1968. Armillaria root and stem rot of prickly pear cactus. *Phytopathology*, 58: 1036–1037.
- Rai, P., Rai, C., Majumdar, G.C., Das Gupta, S. & De, S.** 2006. Resistance in series model for ultrafiltration of mosambi (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) juice in a stirred continuous mode. *J. Membrane Sci.*, 283: 116–122.
- Ramadan, M.F. & Mörsel, J.T.** 2003a. Oil cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L.). *Food Chem.*, 83: 339–345.
- Ramadan, M.F. & Mörsel, J.T.** 2003b. Recovered lipids from prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill] peel: a good source of polyunsaturated fatty acids, natural antioxidant vitamins and sterols. *Food Chem.*, 83: 447–456.
- Ramawat, K.G.** 2010. *Desert plants: Biology and biotechnology*. Dordrecht, Heidelberg, New York, London, Springer. 503 pp.
- Randall, R.P.** 2002. *Global compendium of weeds*. Melbourne (available at www.hear.org/gcw/index.html).
- Rao, V.P., Sankaran, M.A. & Mathur, K.C.** 1971. *A review of biological control of insects and other pests in South-East Asia and the Pacific Region*. Technical Communication No. 6, Slough, UK, CIBC. 149 pp.
- Rascher, U., Hütt, M.T., Siebke, K., Osmond, C.B., Beck, F. & Lüttge, U.** 2001. Spatio-temporal variation of metabolism in a plant circadian rhythm: the biological clock as an assembly of coupled individual oscillators. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 98: 11801–11805.
- Ratsele, C.** 2003. *Production evaluation of Opuntia robusta and O. ficus-indica cultivars in the central Free State*. Bloemfontein, South Africa, University of the Free State (MSc thesis). 110 pp.
- Raveh, E., Gersani, M. & Nobel, P.S.** 1995. CO₂ uptake and fluorescence responses for a shade-tolerant cactus *Hylocereus undatus* under current and doubled CO₂ concentrations. *Physiol. Plant.*, 93: 505–511.
- Raventós, M.** 2005. Tecnología de membranas. In *Industria alimentaria tecnologías emergentes*. Barcelona, Spain, Ediciones UPC.
- Rebman, J.P. & Pinkava, D.J.** 2001. Opuntia cacti in North America. *Fla. Entomol.*, 84: 474–483.
- Retamal, N., Durán, J.M. & Fernández, J.** 1987. Ethanol production by fermentation of fruits and cladodes of prickly pear cactus (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller). *J. Sci. Food Agric.*, 40: 213–218.
- Reveles Hernández, M., Flores Ortiz, M.A., Blanco Macías, F. & Valdez Cepeda, R.D.** 2010. El manejo del nopal forrajero en la producción de ganado bovino. *Rev. Salud Pública Nutr.*, 5[ESP]: 130–144.
- Reyes Agüero, J.A. & Valiente Banuet, A.** 2006. Reproductive biology of Opuntia: a review. *J. Arid Environ.*, 64(4): 549–585.
- Reyes Agüero, A., Aguirre Rivera, R. & Carlin, F.** 2004. Análisis preliminar de la variación morfológica de 38 variantes mexicanas de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. In G. Esparza, R. Valdez & J.G. Méndez, eds. *El nopal, tópicos de actualidad*, pp. 21–47. México, Universidad Autónoma Chapingo, Colegio de Postgraduados.
- Reyes Agüero, J.A., Aguirre Rivera, J.R. & Hernández, H.M.** 2005. Systematic notes and a detailed description of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae). *Agrociencia*, 39: 395–408.
- Reyes Agüero, J.A., Aguirre Rivera, J.R. & Valiente Banuet, A.** 2006. Reproductive biology of Opuntia: a review. *J. Arid Environ.*, 64: 549–585.
- Reyes Agüero, J.A., Aguirre Rivera, J.R., Carlin Castelan, F. & González Durán, A.** 2009. *Catálogo de las principales variantes silvestres y cultivadas de Opuntia en la Altiplanicie Meridional de México*. Mexico, Autonomous University of San Luis Potosí, SAGARPA and CONACYT. 350 pp.
- Reyes Agüero, J.A., Aguirre Rivera, J.R. & Carlin Castelan, F.** 2013. Diversity of wild and cultivated *Opuntia* variants in the Meridional highlands plateau of Mexico. *Acta Hortic.*, 995: 69–74.
- Reynolds, S.G. & Arias, E.** 2001. Introduction. In C. Mondragón Jacobo & S. Pérez González, eds. *Cactus (Opuntia spp.) as forage*, pp. 1–36. FAO Plant Production and Protection Paper No. 169. Rome, Italy. 146 pp.

- Ries, J.B. & Hirt, V. 2008. Permanence of soil surface crust on abandoned farmland in the central Ebro Basin/Spain. *Catena*, 72: 282–296.
- Robert, P., Torres, V., García, P., Vergara, C. & Sáenz, C. 2015. The encapsulation of purple cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) pulp by using polysaccharide-proteins as encapsulating agents. *LWT-Food Sci. Technol.*, 60(2):1039–1045.
- Robinson, H. 1974. Scanning electron microscope studies of the spines and glochids of the Opuntioideae (Cactaceae). *Am. J. Bot.*, 61: 278–283.
- Rocha, G.L. 1991. *Ecosistema de pastagens aspectos dinâmicos*. Piracicaba, Brazil, Luiz de Queiroz Agricultural Studies Foundation. 391 pp.
- Rodríguez, D. 1999. Desarrollo de una bebida pasteurizada a base de nopal. En Memoria VIII Congreso Nacional y VI Internacional sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, San Luis Potosí, Mexico, 6–10 September, pp. 75–76.
- Rodríguez, L.C. & Niemeyer, H.M. 2000. Evidencias indirectas sobre el origen de la cochinitilla, *Dactylopius coccus* (Hemiptera: Dactylopiidae). *Rev. Chilena Entomol.*, 27: 85–89.
- Rodríguez, I. & Portillo, L. 1989. Especies de *Opuntia* hospederas de *Dactylopius coccus* Costa. *Quepo*, 3: 49–53.
- Rodríguez, S.B., Perez, F.B. & Montenegro, D.D. 1975. *Eficiencia fotosintética del Nopal (Opuntia spp.) en relación con la orientación de sus cladodios*. Chapingo, Colegio de Postgraduados (Masters thesis).
- Rodríguez, L.C., Méndez, M.A. & Niemeyer, H.M. 2001. Direction of dispersion of cochineal (*Dactylopius coccus* Costa) within the Americas. *Am. Antiq.*, 75: 73–77.
- Rodríguez, S., Casóliba, R.M., Questa, A.G. & Felker, P. 2005. Hot water treatment to reduce chilling injury and fungal development and improve visual quality of two *Opuntia ficus-indica* fruit clones. *J. Arid Environ.*, 63: 366–378.
- Rodríguez Alvarado, G., Fernández Pavia, S.P. & Landa Hernández, L. 2001. First report of *Pythium aphanidermatum* causing crown and stem rot on *Opuntia ficus-indica*. *Plant Dis.*, 85: 231.
- Rodríguez Felix, A. 2002. Postharvest physiology and technology of cactus pear fruits and cactus leaves. *Acta Hort.*, 581: 191–199.
- Rodríguez Felix, A., Gonzales Sales, H., Soto Valdez, H. & Silveira Gamont, I. 1992. Effect of postharvest treatments on the quality of tuna during storage. In Proceedings of the Third Annual Texas Prickly Pear Council, Kingsville, Texas, USA, pp. 9–12.
- Rodríguez García, C., de Lira, C., Hernández Becerra, E., Cornejo Villegas, M.A., Palacios Fonseca, A.J., Rojas Molina, I., Reynoso, R., Quintero, L.C., Del Real, A., Zepeda, T.A. & Muñoz Torres, C. 2007. Physicochemical characterization of nopal pads (*Opuntia ficus-indica*) and dry vacuum nopal powders as a function of the maturation. *Plant Foods Hum. Nutr.*, 62: 107–112.
- Rodríguez González, S., Martínez Flores, H.E., Chavez Moreno, C.K., Macías Rodríguez, L.I., Zavala Mendoza, E., Garnica Romo, M.G. & Chacon García, L. 2014. Extraction and characterization of mucilage from wild species of *Opuntia*. *J. Food Process Eng.*, 37: 285–292.
- Rodríguez Hernández, G.R., Gonzáles, R., Grajales, A. & Ruiz, M.A. 2005. Spray-drying of cactus pear juice (*Opuntia streptacantha*): Effect on the physicochemical properties of powder and reconstituted product. *Drying Technol.*, 23: 955–973.
- Rojas Graü, M.A., Garner, E. & Martin Belloso, O. 2011. The fresh-cut fruit and vegetables industry: Current situation and market trends. In O. Martin Belloso & R. Soliva Fortuny, eds. *Advances in fresh-cut fruits and vegetables processing*, p. 1–12. Boca Raton, FL, USA, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Roos, Y.H. 2007. Water activity and glass transition. In G.V. Barbosa Cánovas, A.J. Fontana, Jr., S.J. Schmidt & T.P. Labuza, eds. *Water activity in foods: fundamentals and applications*. Ames, Iowa, USA, IFT Press and Blackwell Publishing.
- Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R., Schneider, S.H., Rosenzweig, C. & Pounds, J.A. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421: 57–60.
- Rosas, C.P. & Pimienta, B.E. 1986. Polinización y fase progámica en nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) tunero. *Fitotecnia*, 8: 164–176.
- Ruiz Moreno, A., ed. 1948. *La medicina en el Paraguay natural*. National University of Tucumán. 300 pp.
- Russell, C. & Felker, P. 1987a. Comparative freeze hardiness of fruit vegetable and fodder *Opuntia* accessions. *J. Hortic. Sci.*, 62: 545–550.
- Russell, C.E. & Felker, P. 1987b. The prickly-pears (*Opuntia* spp., Cactaceae): a source of human and animal food in semiarid regions. *Econ. Bot.*, 41(3): 433–445.
- Rutam, I. 1999. Low cost biodigesters for zero grazing smallholder dairy farmers in Tanzania. *Livest. Res. Rural Dev.*, 11(2) (available at <http://www.lrrd.org/lrrd11/2/inno112.htm>). Accessed 10 November 2015.
- Saad, M., Degano, C. & Ochoa, J. 1998. Wet rot and necrosis caused by bacteria in *Opuntia ficus-indica* Mill in Santiago del Estero, Argentina. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 3: 60–63.
- Sáenz, C. 1985. La tuna (*Opuntia ficus-indica*) un cultivo con perspectivas. *Alimentos*, 3: 47–49.
- Sáenz, C. 1999. Elaboración de alimentos y obtención de subproductos. In G. Barbera, P. Inglesse & E. Pimienta Barrios, eds. *Agroecología, cultivo y usos del nopal*, pp. 144–150. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Sáenz, C. 2000. Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia* spp) fruits and cladodes. *J. Arid Environ.*, 46: 209–225.
- Sáenz, C. & Sepúlveda, E. 1999. Physical, chemical and sensory characteristics of juices from pomegranate and purple cactus pear fruit. In Annals 22nd IFU Symposium, 15–19 March, Paris, France, pp. 91–100.
- Sáenz, C. & Sepúlveda, E. 2001a. Cactus-pear juices. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 4: 3–10.
- Sáenz, C. & Sepúlveda, E. 2001b. Ecotipos Coloreados de la Tuna (*Opuntia ficus-indica*). *Aconex*, 72: 29–32.
- Sáenz, C., Corrales García, J. & Aquino Pérez, G. 2002a. Nopalitos, mucilage, fiber, and cochineal. In P.S. Nobel, ed. *Cacti: Biology and uses*, pp. 211–234. Berkeley, CA, USA, University of California Press.
- Sáenz, C., Estévez, A.M., Fontanot, M. & Pak, N. 2002b. Oatmeal cookies enriched with cactus pear flour as dietary fiber source: physical and chemical characteristics. *Acta Hort.*, 581: 275–278.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E., Pak, N. & Vallejos, X. 2002c. Uso de fibra dietética de nopal en la formulación de un polvo para flan. *Arch. Latinoam. Nutr.*, 52(4): 87–92.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E. & Idalsoaga, M. 2002d. Color extract from purple cactus pear: preparation, characteristics and uses. *Cactusnet Newsletter*, 3–4.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E. & Vallejos, M.I. 2003. *Características sensoriales de un néctar de damasco elaborado con hidrocoloide de nopal*. Resúmenes. XIII Congreso Latinoamericano de Nutrición, 10–12 November, Acapulco, Mexico. 195 pp.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E. & Matsuhira, B. 2004. *Opuntia* spp. mucilage: a functional component with industrial perspectives. *J. Arid Environ.*, 57(3): 275–290.
- Sáenz, C., Berger, H., Corrales García, J., Galletti, L., García del Cortazar, V., Higuera, I., Mondragón, C., Rodríguez Félix, A., Sepúlveda, E. & Varnero M.T., eds. 2006. *Utilización agroindustrial del nopal*. FAO Plant Production and Protection Paper No. 162. Rome, FAO. 165 pp.
- Sáenz, C., Tapia, S., Chávez, J. & Robert, P. 2009. Microencapsulation by spray drying of bioactive compounds from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chem.*, 114: 616–622.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E., Pak N. & Lecaros, M. 2010. Chemical and physical characterization of cactus cladodes (*Opuntia ficus-indica*) powder. *Ital. J. Food Sci.*, 22(4): 416–422.
- Sáenz, C., Yoong, M., Figuerola, F., Chiffelle, I. & Estévez, A.M. 2012a. Cactus pear cladodes powders as dietary fibre source: purification and properties. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, 63(3): 283–289.
- Sáenz, C., Cancino, B. & Robert, P. 2012b. Red betalains from *Opuntia* spp.: natural colorants with potential applications in foods. *Isr. J. Plant Sci.*, 60: 291–299.
- Sáenz, C., Berger, H., Corrales García, J., Galletti, L., García del Cortazar, V., Higuera, I., Mondragón, C., Rodríguez Félix, A., Sepúlveda, E. & Varnero, M.T. 2013. *Agro-industrial utilization of cactus pear*. Rural Infrastructure and Agro-Industries Division. Rome, FAO. 150 pp (available at <http://www.fao.org/docrep/019/a0534e/a0534e.pdf>).
- Sajeva, M. & Mauseth, J.D. 1991. Leaflike structure in the photosynthetic, succulent stems of cacti. *Ann. Bot.*, 68: 405–411.
- Salas, D. 2016. *Crianza de cochinitillas*. Proyectos Peruanos (available at <http://proyectosperuanos.com/2016/09/cochinitillas>). Accessed 18 December 2016.
- Samah, S., de Teodoro Pardo, C.V., Serrato Cruz, M.A. & Valadez Motezuma, E. 2015. Genetic diversity, genotype discrimination, and population structure of Mexican *Opuntia* sp., determined by SSR markers. *Plant Mol. Biol. Rep.*, DOI:10.1007/s1105-015-0908-4.
- El Samahy, S.K., Abd El Hady, E.A., Habiba, R.A. & Moussa Ayoub, T.E. 2007a. Cactus pear sheet and pasteurized and sterilized cactus pear juices. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 148–164.
- El Samahy, S.K., Abd El Hady, E.A., Habiba, R.A. & Moussa Ayoub, T.E. 2007b. Some functional, chemical, and sensory characteristics of cactus pear rice-based extrudates. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 136–147.
- El Samahy, S.K., Youssef, K.M. & Moussa Ayoub, T.E. 2009. Producing ice cream with concentrated cactus pear pulp: A preliminary study. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 11: 1–12.

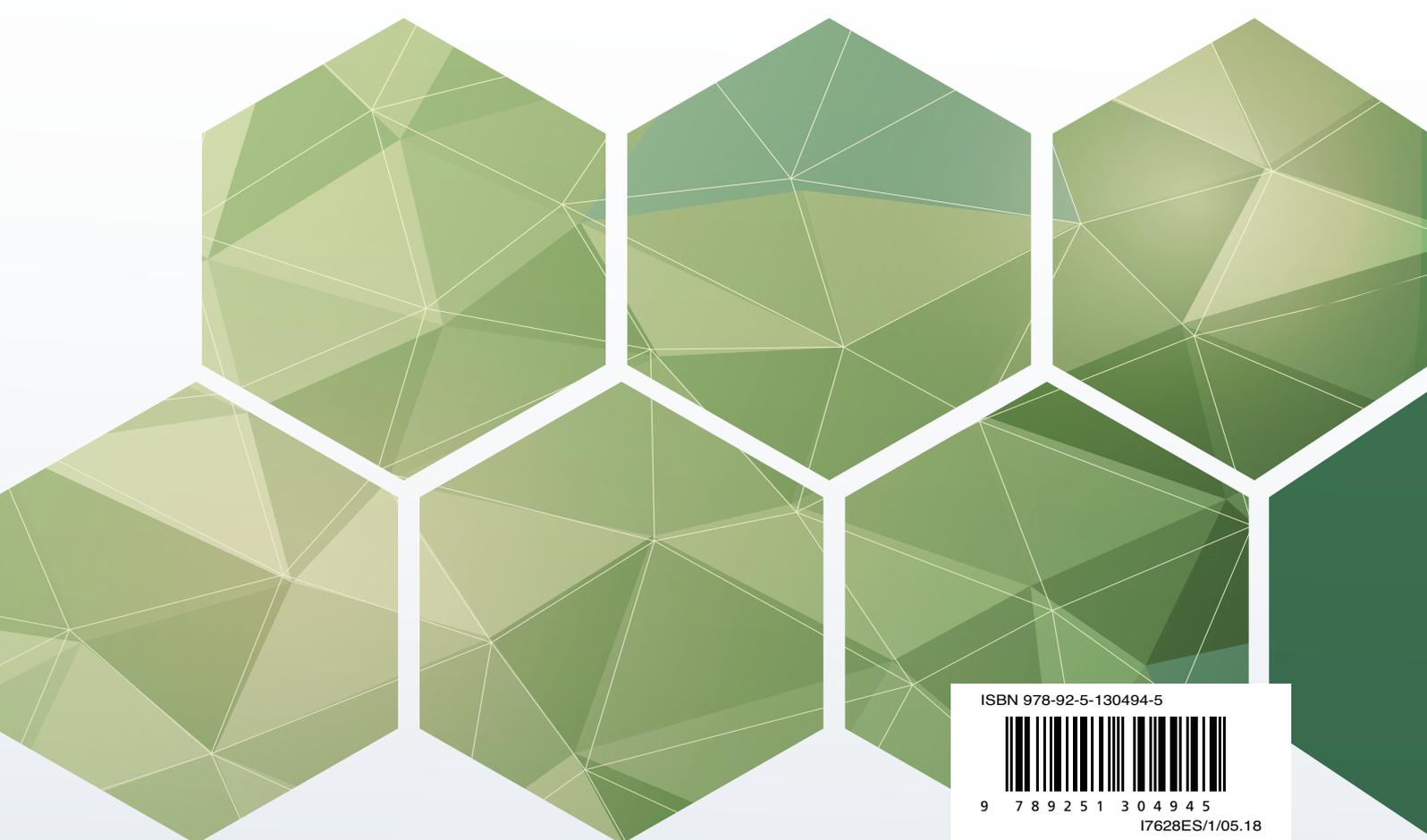
- Samish, Y.B. & Ellern, S.J.** 1975. Titratable acids in *Opuntia ficus-indica* L. *J. Range Manage.*, 28: 365–369.
- Santibáñez, L.G.** 1990. *Ciclo biológico, cultivo y aprovechamiento de la cochinilla del nopal* *Dactylopius coccus* Costa en el municipio de Villa Díaz Ordaz, Tlaxcala, adscrito al centro Coordinador Indigenista (I.N.I.) Zapoteco del Valle Oaxaca. Reporte de Servicio Social. Mexico, Autonomous Metropolitan University. 149 pp.
- Santos, M.V.F. dos, Lira, M. de A., Farias, I., Burity, H.A., Nascimento, M.M.A. do & Tavares Filho, J.J.** 1990. Estudo comparativo das cultivares de palma forrageira "Gigante", "Redonda" (*Opuntia ficus-indica*, Mill) e "Miúda" (*Nopalea cochenillifera*, Salm Dyck) na produção de leite. *Rev. Soc. Bras. Zootec.*, 19(6): 504–511.
- Santos, D.C.S., Farias, I., Lira, M.A., Fernandes, A.P.M., Freitas, E.V. & Moreno, J.A.** 1996. Produção e composição química da palma forrageira cv. gigante (*Opuntia ficus-indica* Mill) sob adubação e calagem, no Agreste Semi-Árido de Pernambuco. *Pesqui. Agropecu. Pernambucana*, 9 [especial]: 69–78.
- Santos, D.C. dos, Santos, M.V.F. dos, Farias, I., Lira, M. de A., Dias, F.M. & Santos, V.F. dos.** 1998. Adensamento e frequências de cortes em cultivares de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*). Anais Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, Botucatu, SP, Brazil, pp. 512–514.
- Santos, D.C. dos, Lira, M. de A., Dias, F.M., Farias, I., Santos, M.V.F. dos & Santos, V.F. dos.** 2000. Produtividade de cultivares de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*). Simpósio Nordeste de Alimentação de Ruminantes, SNPA, Teresina, Recife, Brazil, pp. 121–123.
- Santos, J.R.S., Cezar, M.F., Sousa, W.H., Cunha, M.G.G., Filho, J.M.P. & Sousa, D.O.** 2011. Muscularity and adiposity of carcass of Santa Inês lambs: Effects of different levels of replacement of ground corn by forage cactus meal in finishing ration. *Rev. Bras. Zootec.*, 40: 2267–2272.
- Saraiva, F.M.** 2014. *Desenvolvimento e acúmulo de nutrientes de palma forrageira (Nopalea) em diferentes sistemas de cultivo*. Recife, Brazil, Animal Science Graduate Program, Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE) (PhD Dissertation). 125 pp.
- Sarkar, P., Setia, N. & Choudhury, G.S.** 2011. Extrusion processing of cactus pear. *Adv. J. Food Sci. Technol.*, 3(2): 102–110.
- Sawaya, W.N. & Khan, P.** 1982. Chemical characterization of prickly pear seed oil, *Opuntia ficus indica*. *J. Food Sci.*, 47: 2060–2061.
- Sawaya, W.N., Khatchadourian, H.A., Safi, W.M. & Al Hammad, H.M.** 1983. Chemical characterization of prickly pear pulp, *Opuntia ficus-indica*, and the manufacturing of prickly pear jam. *J. Food Technol.*, 18: 183–193.
- Sawyer, J.E., Knox, L.A., Donart, G.B. & Petersen, M.K.** 2001. The nutritive quality of cholla cactus as affected by burning. *J. Range Manage.*, 54(3): 249–253.
- Scalisi, A., Morandi, B., Inglese, P. & Lo Bianco, R.** 2015. Cladode growth dynamics in *Opuntia ficus-indica* under drought. *Environ. Exp. Bot.*, 122: 158–167.
- Scheinvar, L.** 1995. Taxonomy of utilized *Opuntias*. In G. Barbera, P. Inglese & B.E. Pimental, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 20–27. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Scheinvar, L., Gallegos, C., Olalde, G. & Rodriguez, A.** 2010. *Opuntia* ser. *Streptacanthae* (Cactaceae) – neotypifications and taxonomic notes for four species. *Schumannia*, 6: 277–296.
- Schelle, E.** 1907. *Kakteen*. Tübingen, Germany, A. Fischer.
- Scherm, B., Ortu, G., Muzzu, A., Budroni, M., Arras, G. & Migheli, Q.** 2003. Biocontrol activity of antagonistic yeasts against *Penicillium expansum* on apple. *J. Plant Pathol.*, 85: 205–213.
- Schirra, M., Barbera, G., D'Aquino, S., La Mantia, T. & McDonald, R.E.** 1996. Hot dips and high-temperature conditioning to improve shelf quality of late-crop cactus pear fruit. *Trop. Sci.*, 36: 159–165.
- Schirra, M., Agabbio, M., D'Aquino, S. & McCollum, T.G.** 1997. Postharvest heat conditioning effects on early ripening 'Gialla' cactus pear fruit. *HortScience*, 32: 702–704.
- Schirra, M., D'Hallewin, G., Inglese, P. & La Mantia, T.** 1999a. Epicuticular changes and storage potential of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) fruit following gibberellic acid preharvest sprays and postharvest heat treatments. *Postharvest Biol. Technol.*, 17: 79–88.
- Schirra, M., Inglese, P. & La Mantia, T.** 1999b. Quality of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) fruit in relation to ripening time, CaCl₂ preharvest sprays and storage conditions. *Sci. Hortic. (Amsterdam, Netherlands)*, 81: 425–436.
- Schirra, M., Brandolini, V., Cabras, P., Angioni, A. & Inglese, P.** 2002. Thiabendazole uptake and storage performance of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. cv 'Gialla') fruit following postharvest treatments with reduced doses of fungicide at 52 °C. *J. Agric. Food Chem.*, 50: 739–743.
- Segura, S., Scheinvar, L., Olalde, G., Leblanc, O., Filardo, S., Muratalla, A., Gallegos, C. & Flores, C.** 2007. Genome sizes and ploidy levels in Mexican cactus pear species *Opuntia* (Tourn.) Mill. series *Streptacanthae* Britton et Rose, *Leucotrichae* DC., *Heliabravoanae* Scheinvar and *Robustae* Britton et Rose. *Genet. Resour. Crop Evol.*, 54: 1033–1041.
- Sepúlveda, E. & Sáenz, C.** 1988. Industrialización de la tuna (*Opuntia ficus-indica*). I. Aceite de la semilla. *Alimentos*, 13: 35–38.
- Sepúlveda, E. & Sáenz, C.** 1990. Chemical and physical characteristics of prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) pulp. *Rev. Agroquim. Tecnol. Aliment.*, 30(4): 551–555.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C. & Alvarez, M.** 2000. Physical, chemical and sensory characteristics of dried fruit sheets: cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill) and quince (*Cydonia oblonga* Mill). *Ital. J. Food Sci.*, 12(1): 47–54.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C. & Rojas, A.** 2002. Comparación de un extracto colorante de tuna púrpura (*Opuntia ficus-indica* L.) y un colorante comercial de betarraga en yoghurt. Resúmenes XII Seminario de Ciencia y Tecnología de Alimentos de América Latina y el Caribe, 23–26 July, Asunción, Paraguay.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C. & Vallejos, M.I.** 2003a. Comportamiento reológico de néctar elaborado con hidrocoloide de nopal: efecto del tratamiento térmico. En Memorias IX Congreso Nacional y VII Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, 2–6 September, Zacatecas, Mexico, pp. 269–272.
- Sepúlveda, E., Abraján, M. & Sáenz, C.** 2003b. Estudios preliminares de elaboración de láminas deshidratadas de ecotipos coloreados de tuna. En Memorias IX Congreso Nacional y VII Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, 2–6 September, Zacatecas, Mexico, pp. 278–281.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C. & Gómez, C.** 2003c. Determinación de betanina en ecotipos de tuna roja colectados en Chile. En Memorias IX Congreso Nacional y VII Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, 2–6 September, Zacatecas, Mexico, pp. 282–285.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C. & Vallejos, M.I.** 2004. Efecto del almacenamiento en las propiedades reológicas y sensoriales de néctar de damasco formulado con hidrocoloide de nopal (*Opuntia ficus-indica*). Resúmenes XIII Seminario Latinoamericano y del Caribe de Ciencia y Tecnología de Alimentos, 12–16 October, Montevideo, Uruguay.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga E. & Aceituno, C.** 2007. Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *J. Arid Environ.*, 68: 534–545.
- Serrano, A., Sousa, M., Hallett, J., Lopes, J.A. & Oliveira, M.C.** 2011. Analysis of natural red dyes (cochineal) in textiles of historical importance using HPLC and multivariate data analysis. *Anal. Bioanal. Chem.*, 401: 735–743.
- Serrano, A., Sousa, M., Hallett, J., Simmonds, M.S.J., Nesbitt, M. & Lopes, J.A.** 2013. Identification of *Dactylopius* cochineal species with high-performance liquid chromatography and multivariate data analysis. *Analyst*, 138: 6081–6090.
- Shideed, K., Alary, V., Laamari, A., Nefzaoui, A. & El Mourid, M.** 2007. Ex post impact assessment of natural resource management technologies in crop-livestock systems in dry areas of Morocco and Tunisia. In H. Waibel & D. Zilberman, eds. *International research on natural resource management*, pp. 169–195. CAB International.
- Shine, C., Williams, N. & Gündling, L.** 2000. *A guide to designing legal and institutional frameworks on alien invasive species*. Gland, Switzerland, Cambridge, Bonn, International Union for Conservation of Nature (IUCN). 138 pp.
- Short, H.L.** 1979. *Food habits of Coyotes in a semi desert grass-shrub habitat*. Research Note, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. Forest Service, USDA. 4 pp.
- Shumye, G., Woldetsadik, K. & Fitiwi, I.** 2014. Effect of integrated postharvest handling practices on quality and shelf-life of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) fruits. *J. Postharv. Tech.*, 2: 68–79.
- SIAP (Agricultural and Fishery Information System).** 2014. *Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación, Mexico* (available at www.siap.gob.mx).
- SIAP.** 2015. *Servicio de información agroalimentaria y pesquera*. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola (available at <http://www.siap.gob.mx>). Accessed 19 August 2015.
- Silva, N.G.M.** 2012. *Produtividade, morfometria e acúmulo de nutrientes da palma forrageira sob doses de adubação orgânica e densidades de plantio*. Recife, Brazil, Animal Science, Federal Rural University of Pernambuco (PhD dissertation). 97 pp.
- Singh, G.** 2003. General review of *Opuntias* in India. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 5: 30–46.
- Singh, G.** 2006. An overview of cactus pear research and development in India. *Acta Hort.*, 728: 43–48.

- Singh, R.S. & Singh, V. 2003. Growth and development influenced by size, age and planting methods of cladodes in cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 5: 47–54.
- Singh, S., Gamlath, S. & Wakeling, L. 2007. Nutritional aspects of food extrusion: a review. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 42: 916–929.
- Siriwardhana, N., Shahidi, F. & Jeon, Y.J. 2006. Potential antioxidative effects of cactus pear fruit (*Opuntia ficus-indica*) extract on radical scavenging and DNA damage reduction in human peripheral lymphocytes. *J. Food Lipids*, 13: 445–458.
- Smith, M. 2005. Kies regte turksky kultivar. *Landbouweekblad*, 29 July: 8–9.
- Smith, H.M. & Samach, A. 2013. Constraints to obtaining consistent annual yields in perennial tree crops. I: Heavy fruit load dominates over vegetative growth. *Plant Sci.*, 207: 158–167.
- Smith, S.D., Tissue, D.T., Huxman, T.E. & Loik, M.E. 2009. Ecophysiological responses of desert plants to elevated CO₂: environmental determinants and case studies. In E. De la Barrera & W. Smith, eds. *Perspectives in biophysical plant ecophysiology: A tribute to Park S. Nobel*, pp. 363–390. Mexico City, UNAM.
- Smith, G.F., Figueiredo, E., Boatwright, J.S. & Crouch, N.R. 2011. South Africa's ongoing *Opuntia* Mill. (Cactaceae) problem: the case of *Opuntia microdasys* (Lehm.) Pfeiff. *Bradleya*, 29: 73–78.
- Snoussi Trifa, H., Labra, M. & Ben Salem, H. 2009. Molecular characterization of three Tunisian collections of cactus. *Acta Hort.*, 811: 287–291.
- Snyman, H.A. 2004. Effect of various water applications on root development of *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta* under greenhouse growth conditions. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 6: 35–61.
- Snyman, H.A. 2005. A case study on *in situ* rooting profiles and water-use efficiency of cactus pears, *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta*. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 7: 1–21.
- Snyman, H.A. 2006a. Root distribution with changes in distance and depth of two-year-old cactus pear *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta* plants. *S. Afr. J. Bot.*, 72: 434–441.
- Snyman, H.A. 2006b. A greenhouse study on root dynamics of cactus pear, *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta*. *J. Arid Environ.*, 65: 529–542.
- Soberón, J., Golubov, J. & Sarukhán, J. 2001. The importance of *Opuntia* in Mexico and routes of invasion and impact of *Cactoblastis cactorum* (Lepidoptera: Pyralidae). *Fla. Entomol.*, 84: 486–492.
- Somma, V., Rosciglione, B. & Martelli G.P. 1973. Preliminary observations on gummosis canker, a new disease of prickly pear. *Tec. Agric.*, 25: 437–443.
- Sosa, R. & Acosta, A. 1966. Poliploidia en *Opuntia* spp. *Agrociencia*, 1: 100–106.
- Souto Alves, T., Vanusa da Silva, M., Alves de Almeida, C.M., Oliveira Jordão do Amaral, D., Cordeiro dos Santos, D., Farias, I., Tenório Sabino Donato, V.M. & Da Costa, A.F. 2009. Genetic diversity in cactus clones using ISSR markers. *Acta Hort.*, 811: 55–58.
- Souza, T.C. de. 2015. *Sistemas de cultivo para a palma forrageira cv. Miúda* (Nopalea cocheneiliifera *Salm Dyck*). Recife, Brazil, Animal Science, Federal Rural University of Pernambuco (PhD Dissertation). 74 pp.
- Souza, E.J., Guim, A., Batista, A.M.V., Santos, K.L., Silva, J.R., Morais, N.A.P. & Mustafa, A.F. 2009. Effects of soybean hulls inclusion on intake, total tract nutrient utilization and ruminal fermentation of goats fed spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* Mill.) based diets. *Small Ruminant Res.*, 85: 63–69.
- Souza, A.E.F., Nascimento, L.C., Araújo, E., Lopes, E.B. & Souto, F.M. 2010. Ocorrência e identificação dos agentes etiológicos de doenças em palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill.) no semiárido paraibano. *Biotemas*, 23: 11–20.
- Spencer, J.L. 1955. A cytological study of the Cactaceae of Puerto Rico. *Bot. Gaz.*, 117: 33–37.
- Spodek, M., Ben Dov, Y., Protasov, A., Carvalho, C.J. & Mendel, Z. 2014. First record of *Dactylopius opuntiae* (Cockerell) (Hemiptera: Coccoidea: Dactylopiidae) from Israel. *Phytoparasitica*, 43: 377–379.
- Srekanth, D., Arunasree, M.K., Roy, K.R., Chandramohan Reddy, T., Reddy, G.V. & Reddanna, P. 2007. Betanin a betacyanin pigment purified from fruits of *Opuntia ficus-indica* induces apoptosis in human chronic myeloid leukemia Cell line-K562. *Phyto-medicine*, 14: 739–746.
- Srikanth, K. & Whang, S.S. 2015. Phylogeny of Korean *Opuntia* spp. based on multiple DNA regions. *Turk. J. Bot.*, 39: 635–641.
- Stassen, P.J.C. & Davie, S.J. 1996. *Planting and training systems for citrus and subtropical fruit trees*. ARC-ITSC Information Bulletin No. 285, pp. 10–19.
- Stassen, P.J.C., Davie, S.J. & Snijder, B. 1995. Principles involved in tree management of higher density avocado orchards. *S. Afr. Avoc. Grow. Assoc. Yearb.*, 18: 47–50.
- Stintzing F.C. & Carle, R. 2005. Cactus stems (*Opuntia* spp.): A review on their chemistry, technology, and uses. *Mol. Nutr. Food Res.*, 49: 175–194.
- Stintzing, F.C., Schieber, A. & Carle, R. 2001. Phytochemical and nutritional significance of cactus pear. *Eur. Food Res. Technol.*, 212: 396–407.
- Stintzing, F.C., Herbach, K.M., Mosshammer, M.R., Carle, R., Yi, W., Sellappan, S., Akoh, C.C., Bunch, R. & Felker, P. 2005. Color, betalain pattern and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones. *J. Agric. Food Chem.*, 53: 442–451.
- Stockwell, P. 1935. Chromosome numbers of some of the Cactaceae. *Bot. Gaz.*, 96: 565–570.
- Suaste Dzul, A., Rojas Martínez, R.I., Ochoa Martínez, D., Zavaleta Mejía, E., Pérez Brito, D., Hernández Juárez, C. & Rodríguez Martínez, D. 2012a. Virus associated with thickening of the cladodes of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.). *J. Biotechnol. Biodiversity*, 3: 100–107.
- Suaste Dzul, A., Rojas Martínez, R.I., Zavaleta, M.E. & Pérez, B.D. 2012b. Detección molecular de fitoplasmas en nopal tunero (*Opuntia ficus-indica*) con síntomas de engrosamiento del cladodio. *Rev. Mex. Fitopatol.*, 30: 72–80.
- Sudzuki Hills, F. 1995. Anatomy and morphology. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimentia Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 28–35. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Sudzuki Hills, F., Muñoz, C. & Berger, H. 1993. *El cultivo de la tuna (cactus pear)*. First Edition. Faculty of Agronomic Science, Department of Agricultural Production, University of Chile. 88 pp.
- Sulé, M.A., Paquin, J.P. & Lévy, J.P. 2002. Modelling perceived quality in fruit products: their extrinsic and intrinsic attributes. *J. Food Prod. Mark.*, 8(1): 29–48.
- Sumaya Martínez, M.T., Cruz Jaime, S., Marigal Santillán, E., García Paredes, J.D., Cariño Cortés, R., Cruz Cansino, N., Valadez Vega, C., Martínez Cardenas, L. & Alanis García, E. 2011. Betalain, acid ascorbic, phenolic contents and antioxidant properties of purple, red, yellow and white cactus pears. *Int. J. Mol. Sci.*, 12: 6452–6468.
- Swart, W.J. 2009. Strategies for the management of cactus pear diseases: A global perspective. *Acta Hort.*, 811: 207–216.
- Swart, W.J. & Kriel, W.M. 2002. Pathogens associated with necrosis of cactus pear cladodes in South Africa. *Plant Dis.*, 86: 693–693.
- Swart, W.J. & Swart, V.R. 2002. The current status of research on diseases of *Opuntia ficus-indica* in South Africa. *Acta Hort.*, 581: 239–245.
- Swart, W.J., Oelofse, R.M. & Labuschagne, M.T. 2003. Susceptibility of South African cactus pear varieties to four fungi commonly associated with disease symptoms. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 86–97.
- Tafoya, F. 2006. Manejo del picudo del nopal, *Metamasius spinolae* (Coleoptera: Curculionidae) con feromonas. In J.F. Barrera & P. Monoya, eds. *Simposio sobre Trampas y Atrayentes en Detección, Monitoreo y Control de Plagas de Importancia Económica*, Colima, Mexico, Sociedad Mexicana de Entomología y El Colegio de la Frontera Sur Manzanillo, pp. 27–34.
- Tagliavini, M., Panzacchi, P., Ceccon, C., Liguori, G., Bertolla, C., Meggio, F., Tonon, G., Corelli Grappadelli, L., Celano, G., Gucci, R., Pitacco, A. & Inglese, P. 2008. Fluxes of carbon in Italian orchards. In Abstracts of the 1st Symposium on Horticulture in Europe, Vienna. 90 pp.
- Tangiorgi Tomasi L. & Tosi, A. 1990. *Flora e pomona. L'orticoltura nei disegni e nelle incisioni dei secoli XIV–XIX*. Florence, Italy, Leo S. Olschki Ed.
- Tapia, C.C. 1983. *Cultivo da palma forrageira e figo da índia*. Boletín técnico 141. EMPARN. 41 pp.
- Targa, M.G., Leguizamón, G., Coronel de Renolfi, M. & Ochoa, M.J. 2013. Economic feasibility of *scozzolatura* in traditional and improved orchards of cactus pear in Santiago del Estero, Argentina. *Acta Hort.*, 995: 189–200.
- Tegegne, F. 2001. Nutritional value of *Opuntia ficus indica* as ruminant feed in Ethiopia. In C. Mondragón Jacobo & S. Pérez González, eds. *Cactus (Opuntia spp.) as forage*, pp. 91–99. FAO Plant Production and Protection Paper No. 169. Rome, FAO.
- Tegegne, F., Kijora, C. & Peters, K.J. 2007. Study on the optimal level of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) supplementation to sheep and its contribution as source of water. *Small Ruminant Res.*, 72: 157–164.
- Téllez, O. 1911. La cochinilla o grana. *Bol. Dir. Gen. Agric. Mex.*, 3: 244–255.
- Terrazas Salgado, T. & Arias, S. 2003. Comparative stem anatomy in the subfamily Cactaceae. *Bot. Rev.*, 68: 444–473.
- Terrazas Salgado, T. & Mauseth, J.D. 2002. Shoot anatomy and morphology. In P.S. Nobel, ed. *Cacti: Biology and uses*, pp. 23–40. Berkeley, CA, USA, University of California Press.

- Terrazas Salgado, T., Loza Cornejo, S. & Arreola Nava, H.J.** 2005. Anatomía caulinar de las especies del género *Stenocereus* (Cactaceae). *Acta Bot. Venez.*, 28: 321–336.
- Tesoriere, L., Butera, D.L., D'Arpa, D., Di Gaudio, F., Allegra, M., Gentile C. & Livrea M.A.** 2003. Increased resistance to oxidation of betalain-enriched human low density lipoproteins. *Free Radical Res.*, 37: 689–696.
- Tesoriere, L., Butera, D., Pintauidi, A.M., Allegra, M. & Livrea, M.A.** 2004. Supplementation with cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit decreases oxidative stress in healthy humans: a comparative study with vitamin C. *Am. J. Clin. Nutr.*, 80: 391–395.
- Tesoriere, L., Butera, D., Allegra, M., Fazzari, M. & Livrea, M.A.** 2005a. Distribution of betalain pigments in red blood cells after consumption of cactus pear fruits and increased resistance of the cells to ex vivo induced oxidative hemolysis in humans. *J. Agric. Food Chem.*, 53: 1266–1270.
- Tesoriere, L., Fazzari, M., Allegra, M. & Livrea, M.A.** 2005b. Biothiols, taurine, and lipid-soluble antioxidants in the edible pulp of Sicilian cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruits and changes of bioactive juice components upon industrial processing. *J. Agric. Food Chem.*, 53: 7851–7855.
- Tessitori, M., Masenga, V. & Marzachi, C.** 2006. First report of a phytoplasma associated with abnormal proliferation of cladodes in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) in Italy. *Plant Pathol.*, 55: 292.
- Testoni, A. & Echer Zerbin, P.** 1990. Conservazione del fico d'India in atmosfera normale e controllata. *Ann. Ist. Sper. Valorizzazione Tecnol. Prod. Agric.*, 21: 131–139.
- Timpanaro, G., Urso, A., Spampinato, D. & Foti, V.T.** 2015a. Fresh-cut cactus pear market in Italy: Current scenario and future perspectives. *Acta Hortic.*, 1067: 399–406.
- Timpanaro, G., Urso, A., Spampinato, D. & Foti, V.T.** 2015b. Cactus pear market in Italy: Competitiveness and perspectives. In Proceedings of the VIII International Congress on Cactus Pear and Cochineal. *Acta Hortic.*, 1067: 407–415.
- Tlili, N., Bargougui, A., Elfalleh, W., Triki, A. & Nasri, N.** 2011. Phenolic compounds, protein, lipid content and fatty acids compositions of cactus seeds. *J. Med. Plants Res.*, 5(18): 4519–4524.
- Todisco, S., Tallarico, P. & Gupta, B.** 2002. Mass transfer and polyphenols retention in the clarification of black tea with ceramic membranes. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, 3: 255–262.
- Tohá, J.** 1999. La tuna como fuente de energía. *Rev. Bioplanet.* Santiago, Chile.
- Torres Sales, T.A.** 2010. Sistemas de producción de nopal forrajero en Brasil. *Rev. Salud Pública Nutr.*, 5 [Edición Especial]: 57–69.
- Trachtenberg, S. & Mayer, A.M.** 1981. Composition and properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Phytochem.*, 20(12): 2665–2668.
- Trejo Gonzalez, A., Gabriel Ortiz, G., Puebla Perez, A.M., Huizar Contreras, M.D., Mungia Mazariegos, M.R., Mejia Arreguin, S. & Calva, E.** 1996. A purified extract from prickly pear cactus (*Opuntia filiginosa*) controls experimentally induced diabetes in rats. *J. Ethnopharmacol.*, 55: 27–33.
- Trentacoste, E.R., Connor, D.J. & Gomez del Campo, M.** 2015. Row orientation: applications to productivity and design of hedgerows in horticultural and olive orchards. *Sci. Hortic.*, 187: 15–29.
- Tsuda, S., Murakami, M., Kano, K., Taniguchi, K. & Sasaki, Y.F.** 2001. DNA damage induced by red food dyes orally administered to pregnant and male mice. *Toxicol. Sci.*, 61(1): 92–99.
- Tudisca, S., Di Trapani, A.M., Sgroi, F. & Testa, R.** 2015. Costs, revenues and income of Sicilian farms that cultivate cactus pear. *Acta Hortic.*, 1067: 371–377.
- Tukuypaj.** 1993. *Experiencias en la cría de la cochinilla del carmín en Cochabamba, Bolivia.* 53 pp.
- Turpin, H.W. & Gill, G.A.** 1928. *Versekering teen droogte: teen-droogte-bestande voersoorte met speciale verwyssing na turksvy.* Pamphlet No. 36. Department of Agriculture, Union of South Africa. Pretoria, Government Printer. 64 pp.
- UN-DESA (United Nations Department of Economic and Social Affairs).** 2015. *World population prospects. Key findings and advance tables* (available at https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/files/key_findings_wpp_2015.pdf).
- University of California Cooperative Extension. UC Small Farm Program.** 1989. *Prickly pear cactus production* (available at <http://sfpc.ucdavis.edu/pubs/brochures/Pricklypear/>).
- UNSO/UNDP (Office to Combat Desertification and Drought/United Nations Development Programme).** 1997. *Drought preparedness and management for western African countries.*
- Unterperntinger, T.** 2006. Commercial cactus pear production in South Africa: a farmer's perspective. Abstract in Proceedings of the 2006 International Cactus Pear Conference, 29–31 March 2006, Bloemfontein, South Africa, p. 5.
- Uribe, J., Varnero, M.T. & Benavides, C.** 1992. Biomasa de tuna (*Opuntia ficus-indica* L. Mill) como acelerador de la digestión anaeróbica de guano de bovino. *Simiente*, 62(1): 14–18.
- Valadez Moctezuma, E., Ortiz Vásquez, Q. & Samah, S.** 2014. Molecular based assessment of genetic diversity of xocnostle accessions (*Opuntia* spp.). *Afr. J. Biotechnol.*, 13: 202–210.
- Valadez Moctezuma, E., Samah, S. & Luna Paez, A.** 2015. Genetic diversity of *Opuntia* spp. varieties assessed by classical marker tools (RAPD and ISSR). *Plant Syst. Evol.*, 301: 737–747.
- Valdez Cepeda, R.D., Blanco Macías, F., Magallanes Quintanar, R., Vázquez Alvarado, R.E. & Reveles Hernández, M.** 2009. Avances en la nutrición del nopal en México. *Rev. Salud Pública Nutr.*, 5 [Edición Especial]: 1–14.
- Valdez Cepeda, R.D., Blanco Macías, F., Magallanes Quintanar, R., Vasquez Alvarado, R. & Mendez Gallegos, S. de Jesus.** 2013. Fruit weight and number of fruits per cladode depend on fruiting cladode fresh and dry weight in *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller variety 'Rojo pelon'. *Sci. Hortic.*, 161: 165–169.
- Van Dam, A. & May, B.** 2012. A new species of *Dactylopius* Costa (*Dactylopius gracilipilus* sp. Nov.) (Hemiptera: Coccoidea: Dactylopiidae) from the Chihuahuan Desert, Texas, U.S.A. *Zootaxa*, 3573: 33–39.
- Van Dam, A., Portillo, L., Jeri, A. & May, B.** 2015. Range wide phylogeography of *Dactylopius coccus* (Hemiptera: Dactylopiidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 108: 299–310.
- Van Der Merwe, L.L., Wessels, A.B. & Ferreira, D. I.** 1997. Supplementary irrigation for spineless cactus pear. *Acta Hortic.*, 438: 77–82.
- Vardi, A., Levin, I. & Carmi, N.** 2008. Induction of seedlessness in *Citrus*: from classical techniques to emerging biotechnological approaches. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 133(1): 117–126.
- Vargas, G. & Flores, V.** 1986. Frecuencia de oviposición de la "cochinilla del carmín" *Dactylopius coccus* Costa en condiciones de laboratorio. En Resúmenes del Primer Congreso Nacional de Tuna y Cochinilla, Ayacucho, Peru, pp. 40–41
- Varnero, M.T.** 1991. *Manual de reciclaje orgánico y biogás.* Santiago, Chile, Ministerio de Agricultura (FIA), Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 48 pp.
- Varnero, M.T.** 2001. Sistemas de reciclaje de residuos sólidos orgánicos: biodigestores. *Rev. Chile Agric.*, 26(250): 132–135.
- Varnero, M.T. & Arellano, J.** 1991. *Aprovechamiento racional de desechos orgánicos.* Informe Técnico. Santiago, Chile, Ministerio de Agricultura (FIA), Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 98 pp.
- Varnero, M.T. & García de Cortázar, V.** 1998. Energy and biofertilizer production: alternative uses for pruning-waste of cactus-pear (*Opuntia ficus-indica* L. Mill). In Proceedings of the International Symposium on Cactus Pear and Nopalitos Processing and Uses, 24–26 September 1998, Santiago, Chile, pp. 96–102. Faculty of Agrarian and Forest Sciences, University of Chile, CactusNet.
- Varnero, M.T. & García de Cortázar, V.** 2006. Producción de bioenergía y fertilizantes a partir de los nopales. In C. Sáenz, ed. *Utilización agroindustrial del nopal*, pp. 113–120. Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO No. 162. Rome, FAO.
- Varnero, M.T. & García de Cortázar, V.** 2013. Production of bioenergy and fertilizers from cactus cladodes. In C. Sáenz, ed. *Agro-industrial utilization of cactus pear*, pp. 103–109. Rural Infrastructure and Agro-Industries Division. Rome, FAO. 150 pp.
- Varnero, M.T. & López, X.** 1996. Efecto del tamaño y edad de cladodios de tuna en la fermentación metanogénica de guano de bovino. Boletín No. 11, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, pp. 80–89.
- Varnero, M.T., Uribe, J.M. & López, X.** 1992. Factibilidad de una biodigestión anaeróbica con mezclas de guano caprino y cladodios de tuna (*Opuntia ficus-indica* L. Mill). *Terra Aridae*, 11: 166–172.
- Varvaro, L., Granata, G. & Balestra, G.M.** 1993. Severe *Erwinia* caused damage on *Opuntia ficus-indica* in Italy. *J. Phytopathol.*, 138: 325–330.
- Vasconcelos, A.G.V. de Lira, M.A., Cavalcanti, V.L.B., dos Santos, M.V.F. & Willadino, L.** 2009. Selection of pickly-pear clones resistant to carmine cochineal *Dactylopius* sp. *Rev. Bras. Zootec.*, 38(5): 827–831.
- Vásquez Alvarado, R.E., Olivares Saenz, E., Zavala García, F. & Valdez Cepeda, R.D.** 2006. Utilisation of manure and fertilisers to improve the productivity of cactus pear. *Acta Hortic.*, 728: 151–158.
- Vásquez Alvarado, R., Valdez Cepeda, R.D. & Blanco Macías, F.** 2009. Riego y fertilización del nopal verdura. *Rev. Salud Pública Nutr.*, 2[Edición Especial]: 19–35.
- Vásquez Méndez, R., Ventura Ramos, E., Oleschko, K., Hernández Sandoval, L. & Domínguez Cortázar, M.A.** 2011. Soil erosion processes in semiarid areas: The importance of native vegetation. In *Soil erosion studies*. InTech. 332 pp.

- Veras, R.M.L., De Andrade Ferreira, M., Ramos De Carvalho, F.F. & Chaves Véras, A.S. 2002. Farelo de Palma Forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill) em Substituição ao Milho. 1. Digestibilidade Aparente de Nutrientes. *Rev. Bras. Zootec.*, 31(3): 1302–1306.
- Veras, R.M.L., De Andrade Ferreira, M., De Araújo Cavalcanti, C.V., Chaves Véras, A.S., Ramos De Carvalho, F.F., Arruda Dos Santos, G.R., Souza Alves, K. & De Souto Maior Jr., R.J. 2005. Substituição do Milho por Farelo de Palma Forrageira em Dietas de Ovinos em Crescimento Desempenho. *Rev. Bras. Zootec.*, 34(1): 249–256.
- Vergara, C., Saavedra, J., Sáenz, C., García, P. & Robert, P. 2014. Microencapsulation of pulp and ultrafiltered cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) extracts and betanin stability during storage. *Food Chem.*, 157: 246–251.
- Vessels, H.K., Bundy, C.S. & McPherson, J.E. 2013. Life history and laboratory rearing of *Narnia femorata* (Hemiptera: Heteroptera: Coreidae) with descriptions of immature stages. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 106(5): 575–585.
- Vieira, E. 1996. *Elementary food science*. Fourth Edition. B.V. Hathorne, Massachusetts, USA, Springer-Science, Business Media.
- Viguera, A.L. & Portillo, L. 2014. *Control de cochinilla Silvestre y Cría de Grana Cochinilla*. Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología del Estado de Jalisco. 66 pp.
- Viguera, A.L., Portillo, L. & Flores, V.I. 1993. Influencia de los macro y microelementos aplicados a cladodios de *Opuntia ficus-indica* sobre el desarrollo de la cochinilla. *Quepo*, 7: 81–91.
- Volchansky, C.R., Hoffmann, J.H. & Zimmermann, H.G. 1999. Host-plant affinities of two biotypes of *Dactylopius opuntiae* (Homoptera: Dactylopiidae) enhanced prospects for biological control of *Opuntia stricta* (Cactaceae) in South Africa. *J. Appl. Ecol.*, 36: 85–91.
- Walkington, D.L. 1968. The taxonomic history of southern California Prickly Pears. *Cact. Succ. J. (Los Angeles)*, 40: 186–192.
- Walters, M., Figueiredo, E., Crouch, N.R., Winter, P.J.D., Smith, G.F., Zimmermann, H.G. & Mashope, B.K. 2011. Naturalised and invasive succulents of southern Africa. *Abc Taxa*, 11 (available at www.abctaxa.be).
- Walther, G.R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.M., Hoegh-Guldberg, O. & Bairlein, F. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416: 389–395.
- Wang, N. & Nobel, P.S. 1996. Doubling the CO₂ concentration enhances the activity of carbohydrate-metabolism enzymes, source carbohydrate production, photoassimilate transport, and sink strength for *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiol.*, 110: 893–902.
- Wang, X., Felker, P. & Paterson, A. 1997. Environmental influences on cactus pear fruit yield, quality and cold hardiness and development of hybrids with improved cold hardiness. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 2: 48–59.
- Wang, X., Felker, P., Burrow, M.D. & Paterson, A.H. 1998. Comparison of RAPD marker patterns to morphological and physiological data in the classification of *Opuntia* accessions. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 3: 3–14.
- Wang, X., Felker, P., Burrow, M.D. & Paterson, A.H. 1999. Comparison of RAPD marker patterns to morphological and physiological data in the classification of *Opuntia* accessions. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 3: 3–15.
- Weedin, J.F. & Powell, A.M. 1978. Chromosome numbers in Chihuahuan desert Cactaceae. *Trans-Pecos Texas. Am. J. Bot.*, 65: 531–537.
- Weiss, J., Nerd, A. & Mizrahi, Y. 1993a. Vegetative parthenocarpy in the cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) *Ann. Bot.*, 72(6): 521–526.
- Weiss, Y., Edelman, S. & Fahle, M. 1993b. Models of perceptual learning in vernier hyperacuity. *Neural Comput.*, 5: 695–718.
- Wessels, A.B. 1988a. *Spineless prickly pears*. Johannesburg, South Africa, Perksor. 61 pp.
- Wessels, A.B. 1988b. Snoei, vruguitdunning, vrugontwikkeling en vrugkwaliteit van doringlose turksyve. In Proceedings of the First National Symposium on Fruit Production of Spineless Prickly Pears, 2–4 February 1988, University of Pretoria, South Africa, pp. 12–20.
- Wessels, A.B. 1988c. Geografiese verspreiding van die doringlose turksyve *Opuntia ficus-indica* Mill. In Proceedings of the First National Symposium on Fruit Production of Spineless Prickly Pears, 2–4 February 1988, University of Pretoria, South Africa, pp. 1–6.
- Wessels, A.B. 1988d. *Kritiese evaluering van 'n aantal doringlose turksyvekultivars*. In Proceedings of the First National Symposium on Fruit Production of Spineless Prickly Pears, 2–4 February 1988, University of Pretoria, South Africa, pp. 21–24.
- Wessels, A.B. 1989. *Morfogenese en potensiaal van die turksyvvrug (Opuntia ficus-indica (L.) Mill.)*. Pretoria, South Africa, Department of Horticulture, University of Pretoria (DSc thesis). 248 pp.
- Wessels, A.B. 1992a. Turksyve vir die mark (1): klimaat en kultivars. *Landbouweekblad*, 4 Sept.: 40–41.
- Wessels, A.B. 1992b. Turksyve vir die mark (4): Pluk, hantering en verpakking. *Landbouweekblad*, 25 Sept.: 34–37.
- Wessels, A.B. & Swart, E. 1990. Morphogenesis of the reproductive bud and fruit of the prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L. Mill. cv Morado). *Acta Hort.*, 275: 245–253.
- Wessels, A.B., Van Der Merwe, L.L. & Du Plessis, H. 1997. Yield variation in clonally propagated *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. plants when terminal cladodes are used. *Acta Hort.*, 438: 73–76.
- White Dove Farm. 2015. *The living cactus fence: Botanical name: Opuntia violacea santa rita. Common name: Blue Opuntia* (available at <http://www.whitedovesfarmfresh.com/Cactus-Fencing-Opuntia-and-Prickly-Pear-Cereus-White-Dove-Farm.html>).
- Wiese, J., McPherson, S., Odden, M.C. & Shlipak, M.G. 2004. Effect of *Opuntia ficus-indica* on symptoms of the alcohol hangover. *Arch. Intern. Med.*, 164: 1334–1340.
- Winckler, G. 2002. *The CCD as a strategic framework for natural resource management in dry zones - Mainstreaming the CCD, and synergies between the conventions*. Proceedings of the 12th ISCO Conference, Volume IV, 26–31 May 2002, Beijing, China. 651 pp.
- Winston, R.L., Schwarzländer, M., Hinz, H.L., Day, M.D., Cock, M.J.W. & Julien, M., eds. 2014. *Biological control of weeds: A world catalogue of agents and their target weeds*. 5th Edition. Morgantown, West Virginia, USDA Forest Service, Forest Health Technology Enterprise Team. 838 pp.
- Wolfram, R.M., Kritz, H., Efthimiou, Y., Stomatopoulos, J. & Sinsinger, H. 2002. Effect of prickly pear (*Opuntia robusta*) on glucose- and lipid-metabolism in non-diabetics with hyperlipidemia-a pilot study. *Wien. Klin. Wochenschr.*, 114: 840–846.
- Wolfram, R.M., Budinsky, A., Efthimiou, Y., Stomatopoulos, J., Oguogho, A. & Sinsinger, H. 2003. Daily prickly pear consumption improves platelet function. *PLEFA*, 69: 61–66.
- Wolstenholme, B.N. 1977. A simple climatic classification for tropical and sub-tropical areas and fruits in South Africa. *Crop Prod.*, 6: 35–39.
- Wright, N. 1963. A thousand years of cochineal. A lost but traditional Mexican industry on its way back. *Am. Dyest. Rep.*, 52: 53–62.
- Wu, L.C., Hsu, H.W., Chen, Y.C., Chiu, C.C., Lin, Y.I. & Ho, J.A. 2006. Antioxidant and antiproliferative activities of red pitaya. *Food Chem.*, 95: 319–327.
- Yahia, E.M. & Mondragón, J.C. 2011. Nutritional components and anti-oxidant capacity of ten cultivars and lines of cactus pear fruit (*Opuntia* spp.). *Food Res. Int.*, 44: 2311–2318.
- Yahia, E.M. & Sáenz, C. 2011. Cactus pear (*Opuntia* species). In E.M. Yahia, ed. *Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits*, Vol. 2, pp. 290–329. Cambridge, UK, Woodhead Publishing.
- Yahia, E.M., Ornelas, J. de J. & Anaya, A. 2009. Extraction and chemical characteristics of mucilage from mesquite, Aloe vera, maguay and prickly pear cactus cladodes (nopal) and evaluation of its prebiotic effect on the growth of 2 probiotic bacteria. *Acta Hort.*, 841: 625–628.
- Yáñez Fernández, J., Salazar Montoya, J.A., Chaires Martínez, L., Jiménez Hernández, J., Márquez Robles, M. & Ramos Ramírez, E.G. 2002. Aplicaciones biotecnológicas de la microencapsulación. *Avance y Perspectiva*, 21: 313–319.
- Yang, N., Zhao, M., Zhu, B., Yang, B., Chen, C., Cui, C. & Jiang, Y. 2008. Anti-diabetic effects of polysaccharides from *Opuntia monacantha* cladode in normal and streptozotocin-induced diabetic rats. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, 9: 570–574.
- Zeeman, D.Z. 2005. *Evaluation of sun-dried Opuntia ficus-indica var. Algerian cladodes in sheep diets*. Bloemfontein, South Africa, University of the Free State (MSc dissertation).
- Zegbe Dominguez, J.A. & Mena Covarrubias, J.M. 2006. *Modificación de la floración, maduración y época de cosecha del nopal tunero (Opuntia spp.)*. Folleto Científico No. 8. Zacatecas, Mexico, INIFAP.
- Zegbe Dominguez, J.A. & Mena Covarrubias, J. 2009. Flower bud thinning in 'Rojo Liso' cactus pear. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.*, 84: 595–598.
- Zegbe Dominguez, J.A. & Mena Covarrubias, J. 2010a. Two reproductive bud thinning alternatives for cactus pear. *HortTechnol.*, 20: 202–205.
- Zegbe Dominguez, J.A. & Mena Covarrubias, J. 2010b. Postharvest changes in weight loss and quality of cactus pear undergoing reproductive bud thinning. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 12: 1–11.
- Zegbe Dominguez, J.A., Serna Perez, A. & Mena Covarrubias, J. 2014. Mineral nutrition enhances yield and affects fruit quality of 'Cristalina' cactus pear. *Sci. Hortic.*, 167: 63–70.
- Zegbe Dominguez, J.A., Serna Perez, A. & Mena Covarrubias, J. 2015. Irrigation enhances postharvest performance of 'Cristalina' cactus pear fruit. *Acta Hort.*, 1067: 417–422.
- Zemon, J. 2015. *The desert cactus. Cactus is an American plant* (available at <http://www.desertusa.com/cactus/the-cactus.html>).

- Zimmermann, H.G. 2010. *Notes on cactus invasions in Namibia*. FAO Report UTF/NAM/004/NAM. 20 pp.
- Zimmermann, H.G. 2011. History of invasive succulent plants in the region. *Abc Taxa*, 11: 13–19.
- Zimmermann, H.G. & Granata, G. 2002. Insect pests and diseases. In P.S. Nobel, ed. *Cacti: Biology and uses*, pp. 235–254. Berkeley, CA, USA, University of California Press.
- Zimmermann, H.G. & Moran, V.C. 1982. Ecology and management of cactus weeds in South Africa. *S. Afr. J. Sci.*, 78: 314–320.
- Zimmermann, H.G., Moran, V.C. & Hoffmann, J.H. 2001. The renowned cactus moth, *Cactoblastis cactorum* (Lepidoptera, Pyralidae): its natural history and threat to native *Opuntia* floras in Mexico and the United States. *Diversity and Distribution*, 6: 259–269.
- Zimmermann, H.G., Moran, V.C. & Hoffmann, J.H. 2009. Invasive cactus species (Cactaceae). In R. Muniappan, G.V.P. Reddy & A. Raman, eds. *Biological control of tropical weeds using arthropods*, pp. 108–129. Cambridge University Press.
- Zoghalmi, N., Chrita, I., Bouamama, B., Gargouri, M., Zemni, H., Ghorbel, A. & Mliki, A. 2007. Molecular based assessment of genetic diversity within Barbary fig (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) in Tunisia. *Sci. Hortic.*, 113: 134–141.
- Zou D.M., Brewer, M., Garcia, F., Feugang, J.M., Wang, J., Zang, R., Liu, H. & Zou, C.P. 2005. Cactus pear – a natural product in cancer chemoprevention. *Nutr. J.*, 4: 25–29.
- Zourgui, L., El Golli, E., Bouaziz, C., Bacha, H. & Hassen, W. 2008. Cactus (*Opuntia ficus-indica*) cladodes prevent oxidative damage induced by the mycotoxin zearalenone in Balb/C mice. *Food Chem. Toxicol.*, 46: 1817–1824.
- Zuñiga Tarango, R., Orona Castillo, I., Vázquez Vázquez, C., Murillo Amador, B., Salazar, E., López Martínez, J.D., García Hernández, J.L. & Rueda Puente, E. 2009. Desarrollo radical, rendimiento y concentración mineral en nopal *Opuntia ficus indica* L. Mill. en diferentes tratamientos de Fertilización. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 11: 53–68.



ISBN 978-92-5-130494-5



9 789251 304945

I7628ES/1/05.18