



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE ESEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN SUELOS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE

MANEJO INTEGRAL DE LAS GLÓQUIDAS DEL NOPAL TUNERO

TESIS

Que como requisito parcial para
obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA
EL DESARROLLO SOSTENIBLE

Presenta:

ALONSO ULLOA LEITÓN



Bajo la supervisión de: Dra. María Edna Álvarez Sánchez



Chapingo, Estado de México, febrero de 2020

MANEJO INTEGRAL DE LAS GLÓQUIDAS DEL NOPAL TUNERO

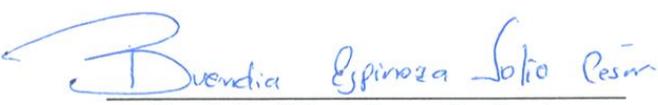
Tesis realizada por **Alonso Ulloa Leitón** bajo la supervisión del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

DIRECTORA:


Dra. María Edna Álvarez Sánchez

ASESOR:


Dr. Julio César Buendía Espinosa

ASESORA EXTERNA:


Mc. Cecilia García Osorio
Colegio de Postgraduados

ASESOR EXTERNO:


Dr. Francisco Gavi Reyes
Colegio de Postgraduados

ASESOR:


Dr. Ranferi Maldonado Torres

I. Contenido

II. ÍNDICE DE FIGURAS	v
III. ÍNDICE DE CUADROS	vii
DEDICATORIA.....	ix
AGRADECIMIENTOS	x
DATOS BIOGRÁFICOS	xi
IX RESUMEN GENERAL.....	xii
X. GENERAL ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo General.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. MARCO TEÓRICO.....	3
3.1 Sistema de producción de tuna de nopal	3
3.2 Ciclo productivo.....	6
3.3 Etapas del proceso productivo	7
3.4 Técnicas de mantenimiento de una plantación de tuna	11
3.5 Impacto ambiental de la producción de tuna.....	17
3.6 Composición y estructura de la espina del cladodio	20
3.7 Técnicas de degradación de materiales orgánicos	23
3.8 Azúcares Reductores	28
ARTÍCULO 1: ESTRUCTURA, MORFOLOGÍA Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE GLÓQUIDAS DE TUNA PARA USOS POTENCIALES EN AGRONOMÍA	30
RESUMEN.....	30
SUMMARY	- 31 -
INTRODUCCIÓN.....	- 31 -

MATERIALES Y MÉTODOS.....	- 33 -
Colecta de glóquidas.....	- 33 -
Estructura externa de las glóquidas	- 33 -
Determinación de celulosa, hemicelulosa y lignina	- 33 -
Rendimiento de la hidrólisis.....	- 33 -
Determinación de los azúcares reductores totales.....	- 35 -
Determinación del contenido nutrimental de las glóquidas	- 36 -
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	- 37 -
Estructura externa de las espinas de tuna	- 37 -
Celulosa, hemicelulosa y lignina de la pared celular de las espinas	- 39 -
Rendimiento de la Hidrólisis.....	- 39 -
Contenido nutrimental de las glóquidas de tuna y de los extractos.....	- 41 -
Limitaciones del estudio e implicaciones.....	- 43 -
CONCLUSIONES	- 43 -
BIBLIOGRAFÍA.....	- 44 -
ARTÍCULO 2: IMPACTO AMBIENTAL DE LAS GLÓQUIDAS DE TUNA Y POTENCIAL DE USO EN LA NUTRICIÓN DE CULTIVOS	- 48 -
RESUMEN.....	- 48 -
SUMMARY	- 49 -
INTRODUCCIÓN	- 50 -
MATERIALES Y MÉTODOS	- 51 -
Recolección del material	- 51 -
Rendimiento de la producción de glóquidas.....	- 51 -
Impacto ambiental en el municipio de Nopaltepec	- 51 -
Uso potencia como fertilizante foliar.....	- 52 -
Evaluación del insumo de nutrición vegetal en rosas bajo invernadero	- 53 -
Análisis estadístico.....	- 53 -
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	- 54 -
Impacto ambiental de las glóquidas de tuna	- 54 -

Rendimiento de la producción de glóquidas.....	- 54 -
Potencial de los extractos de glóquidas como fertilizante foliar en el cultivo de rosa	
- 55 -	
Análisis estadístico del experimento	- 59 -
CONCLUSIONES	- 60 -
BIBLIOGRAFÍA.....	- 61 -
4. CONCLUSIONES GENERALES	- 63 -
5. LITERATURA CITADA	- 64 -

II. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas del proceso productivo de la tuna.	8
Figura 2. Etapas del proceso productivo de la tuna. a) Preparación del terreno, b) Selección de pencas, c) Densidad de plantación, d) Cosecha de tuna, e) Desespinado de tuna, f) Comercialización de tuna.	11
Figura 3. Estiércol bovino en una plantación de tuna.....	12
Figura 4. Tipos de podas en plantación de tuna en San Felipe Teotitlán, México: a) Poda de fructificación, b) Poda de rejuvenecimiento, y c) Poda de formación.....	14
Figura 5. Principales plagas y enfermedades en la plantación de nopal tunero. Fuente: (Aguilar Zamora <i>et al.</i> , 2008).....	17
Figura 6. Espinas y agroquímicos generados por la actividad de tuna en San Felipe Teotitlán, Estado de México (fuente propia).....	18
Figura 7. Residuos orgánicos en plantaciones de tuna: a) y c) Podas, b) y d) Glóquidas de tuna (fuente propia).....	20
Figura 8. Estructura celular de la madera de abeto (izquierda) y de la espina del Opuntia a la derecha (Gindl-Altmutter & Jozef, 2012).....	21
Figura 9. Espina del cladodio de nopal, a) Cladodio, b) Estructura externa de la espina (Malainine et al., 2003).	22
Figura 10. Estructura externa de las glóquidas. a) Barbas retrorsa de la glóquida, b) Parte basal de las glóquidas (Robinson, 1974).....	23
Figura 11. Ruta de fotosintatos desde el tejido fuente hacia el tejido demanda. (a). Mecanismos de carga y descarga del floema vía simplasto, (b, d) Mecanismos de carga y descarga vía apoplasto (c, e). La sacarosa puede ser incorporada por un transportador (H ⁺ /sacarosa) (f). Hidrolisis por invertasa de pared (g). Los productos glucosa y fructosa son incorporados por transportadores (H ⁺ /hexosa) (Padilla Chacón & Martínez Barajas, 2007).	29
Figura 12. Estructura externa de glóquidas. A. Glóquida, parte apical (Scheinvar, Olalde-Parra, & Gallegos-Vázquez, 2015), B. Ápice de una espina (Scheinvar et al., 2015), C. Glóquida (presente estudio), D. Corte transversal de la Glóquida (presente estudio).	- 38 -

Figura 13. Estructura de externa de *Opuntia ficus-indica* con MEB a) Glóquidas molidas 100x. b) Glóquida trozada 3208x. - 38 -

Figura 16. Modelo de regresión lineal para la estimación de glóquidas. - 54 -

Figura 17. Medias obtenidas de las variables evaluadas en el cultivo de rosas. a) Diámetro basal de tallo, b) Diámetro de pedúnculo, c) Longitud de tallo, d) Longitud de pedúnculo, f) Vida floral..... - 58 -

III. ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tipología de productores de tuna en el estado de Hidalgo.....	5
Cuadro 2. Matriz FODA del sistema productivo de tuna en el Estado de México. ...	6
Cuadro 3. Porcentajes de cosecha mensual de las principales variedades de tuna en las regiones productoras de México.....	7
Cuadro 4. Dosis recomendadas de materia orgánica en plantaciones de nopal tunero.....	12
Cuadro 5. Fertilizantes químicos para nopal tunero.....	13
Cuadro 6. Tipos de poda en plantación de tuna.....	13
Cuadro 7. Principales plagas en la producción de tuna de nopal.....	15
Cuadro 8. Principales enfermedades del nopal tunero.....	16
Cuadro 9. Pretratamientos para hidrolizar el material celuloso.....	24
Cuadro 10. Azúcares Reductores Totales (ART) y rendimientos de glucosa después de la hidrólisis del bagazo pre-tratado [cribado (S) y no cribado (NS)] con H ₂ O ₂ ..	26
Cuadro 11. Rendimientos de los Azúcares Reductores Totales (ART) y glucosa después de la hidrólisis del bagazo pre tratado (cribado (S) y no cribado (NS)) con Ca (OH) ₂	26
Cuadro 12. Tratamientos utilizados en diferentes residuos lignocelulósicos para su hidrolisis.....	- 27 -
Cuadro 13. Tratamientos aplicados para la obtención de azúcares reductores.-	34 -
Cuadro 14. Curva de calibración para la determinación de azúcares reductores. ...	- 36 -
Cuadro 15. Calidad de las glóquidas de tuna <i>Opuntia ficus-indica</i>	- 39 -
Cuadro 16. Rendimiento del proceso de hidrólisis.....	- 41 -
Cuadro 17. Contenido nutrimental de las glóquidas de tuna y de los extractos producto de la hidrólisis.....	- 42 -
Cuadro 18. Contenido nutrimental de diferentes partes de la tuna.	- 43 -
Cuadro 19. Soluciones nutritivas a partir de las glóquidas del fruto de tuna.	- 53 -
Cuadro 20. Estimación de la producción de glóquidas para el municipio de Nopaltepec, Estado de México.....	- 55 -
Cuadro 21. Medias obtenidas de cada variable evaluada en cultivo de rosas. .-	56 -

Cuadro 22. Prueba de normalidad, homocedasticidad para las variables del experimento del cultivo de rosas.- 59 -

Cuadro 23. Prueba de Kruskal-Wallis en el experimento de cultivo de rosas. ...- 59 -

Cuadro 24. Análisis de varianza en rosas en respuesta a los fertilizantes foliares. . - 60 -

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de conocer diferentes personas que me dejaron una enseñanza en mi formación profesional, al espíritu de la perseverancia y la determinación, por la salud y por guiarme siempre hacia donde debo estar.

A mi familia, especialmente a mis padres Yadira Leitón Salas y Rogelio Ulloa Chaverri que me brindaron siempre el apoyo durante este trayecto.

A mi pareja, amigos y colegas que siempre me apoyaron en los momentos difíciles.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por permitirme cursar los estudios de maestría en México por medio de la adjudicación de una beca.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), por ser determinante en mi desarrollo profesional, cultural y personal.

Al posgrado en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible y su coordinadora la Dra. María Edna Álvarez Sánchez, por la educación de calidad, el apoyo otorgado, la confianza y el refuerzo de valores durante todo el proceso de formación.

Al Dr. Ranferi Maldonado Torres, por compartir su experiencia profesional conmigo y de enseñarme la aplicabilidad del conocimiento teórico en la vida práctica. Al Dr. Julio César Buendía Espinosa, por apoyarme en el proyecto de investigación. A la M.C. Cecilia García del Colegio de Postgraduados (COLPOS), por apoyarme en el proyecto de investigación. Al Dr. Francisco Gavi Reyes del COLPOS del Departamento de Edafología e Hidrociencias por recibirme en la Estancia de Investigación y aportar sus conocimientos prácticos al proyecto.

Al productor C. Cesar de San Felipe Teotitlán por apoyarme en todo el proceso de obtención de datos de campo y recolección de material.

A los demás profesores del posgrado que fueron una pieza importante en mi formación y a mis colegas y compañeros del posgrado; colegas del Departamento de Enseñanza e Investigación en Suelos, el personal administrativo y todos los amigos mexicanos que fueron un motor para culminar este proceso.

DATOS BIOGRÁFICOS



Alonso Ulloa Leitón nació el 19 de septiembre de 1991 en la provincia de San José en Costa Rica, CURP: UOLA910919HNELTL03. Realizó sus estudios de primaria en la Escuela Jesús Jiménez del cantón de Central en Cartago, posteriormente cursó la secundaria en el Colegio Seráfico San Francisco. Ingresó en el año 2009 al Tecnológico de Costa Rica (TEC), donde estudió la carrera de Ingeniería Forestal del cual obtuvo su grado de Licenciatura en el 2015. Posteriormente, en el año 2018 fue admitido a la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) en Texcoco de Mora, Estado de México, México e inició sus estudios de posgrado en la Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible.

Ha participado en congresos para la divulgación de sus proyectos en el Congreso Nacional de Suelos en Costa Rica y en la Conferencia Norteamericana sobre Agroforestería (AFTA 2019) en Oregón, Estados Unidos.

IX RESUMEN GENERAL

MANEJO INTEGRAL DE LAS GLÓQUIDAS DEL NOPAL TUNERO ¹

Las glóquidas de la tuna es un residuo orgánico que se deriva del beneficiado del fruto previo a su comercialización. Este residuo se desecha en bolsas plásticas a la orilla de plantaciones o en basureros no regulados donde se acumula debido a su alta resistencia a la degradación natural y a la combustión. El objetivo de la presente investigación fue estudiar la estructura, morfología y composición química de las glóquidas de tuna para evaluar su aprovechamiento como insumo con valor agregado a partir de su hidrólisis ácida o alcalina. La estructura externa de las glóquidas se observó por MEB (Microscopio Electrónico de Barrido) y se encontró que poseen barbas retrorsas. Las dimensiones de las glóquidas en cortes transversales y longitudinales en microscopio son de $67.3 \pm 9.56 \mu\text{m}$ y $1667 \pm 292 \mu\text{m}$, respectivamente. Los análisis químicos indicaron que su composición estructural es 41.15% celulosa, 41.20% hemicelulosa y 5.27% lignina; y su densidad de 0.157 g mL^{-1} . Los mayores porcentajes de degradación y obtención de azúcares reductores totales se obtuvieron a partir de la hidrólisis con Ácido Sulfúrico, Ácido Fosfórico e Hidróxido de Potasio. Estas soluciones fueron evaluadas como fertilizantes foliares en la calidad de rosas y de tuna.

El impacto ambiental para el municipio de Nopaltepec se proyectó mediante un modelo de regresión lineal $Y = 0.5628 X$, donde se obtuvo 80.1 t de glóquidas para el periodo 2010-2015. En la aplicación de los fertilizantes foliares (a partir de la hidrólisis de las glóquidas) en el cultivo de rosas, se encontró diferencia significativa con el tratamiento de ácido sulfúrico de concentración en la longitud

¹ Tesis de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo.
Autor: Alonso Ulloa Leitón
Tutor: María Edna Álvarez Sánchez

de pedúnculo. Las glóquidas tienen potencial de reintegrarse como insumo nutrimental en cultivos.

Palabras clave: *Opuntia ficus-indica*, glóquidas, hidrólisis, azúcares reductores totales, impacto ambiental, fertilización foliar.

X. GENERAL ABSTRACT

INTEGRAL MANAGEMENT OF THE PRICKLY PEAR CACTUS GLOCHIDS¹

The glochids of the prickly pear are an organic residue that is derived from the beneficiary of the fruit prior to its commercialization. This waste is disposed of in plastic bags at the edge of plantations or in unregulated dumps where it accumulates due to its high resistance to natural degradation and combustion. The objective of this research was to study the structure, morphology and chemical composition of prickly pear glochids to evaluate their use as an input with added value from their acidic or alkaline hydrolysis. The external structure of the glochids was observed by MEB (Scanning Electron Microscope) and found back beards. The dimensions of the gland in cross and longitudinal sections under a microscope are $67.3 \pm 9.56 \mu\text{m}$ and $1667 \pm 292 \mu\text{m}$, respectively. Chemical analyzes indicated that its structural composition is 41.15% cellulose, 41.20% hemicellulose and 5.27% lignin; and its density of 0.157 g mL^{-1} . The highest degradation percentages and obtaining total reducing sugars were obtained from the hydrolysis with Sulfuric Acid, Phosphoric Acid and Potassium Hydroxide. These solutions were evaluated as foliar fertilizers in the quality of roses and prickly pear.

¹ Tesis de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo.
Autor: Alonso Ulloa Leitón
Tutor: María Edna Álvarez Sánchez

The environmental impact for the municipality of Nopaltepec was projected using a linear regression model $Y = 0.5628 X$, where 80.1 t of glochids was obtained for the 2010-2015 period. In the application of foliar fertilizers (from the hydrolysis of the glochids) in the cultivation of roses, a significant difference was found with the treatment of sulfuric acid concentration in the peduncle length. glochids have the potential to reintegrate as a nutritional input in crops.

Keywords: *Opuntia ficus-indica*, glochids, hydrolysis, total reducing sugars, environmental impact, foliar fertilization.

1. INTRODUCCIÓN

La producción del nopal tunero se origina en México, y se ha distribuido a diferentes partes del mundo. Esta actividad económica aporta una fuente de ingresos importantes para dichas zonas, también beneficia el suelo debido a la alta eficiencia en el uso del agua, retención de suelo, sirve también como alimento para la fauna silvestre, fijación de carbono, entre otros (Francisco & Mayorga, 2011). Esta especie es considerada como una de las plantas más versátiles de la naturaleza y con múltiples formas de aprovechamiento sobre todo en aquellas regiones con escaso rendimiento de los cultivos anuales tradicionales (Vázquez *et al.*, 2012). Por lo que es uno de los cultivos agrícolas más representativos e importantes en México.

La producción nacional de este fruto, de acuerdo con estadísticas del SIAP-SAGARPA (2016) pasó de 43,000 t en 1980 a 408,000 t en el 2015. (Domínguez-García, Granados-Sánchez, Sagarnaga-Villegas, & María, 2017). Lo que indica que esta actividad económica ha tenido un papel muy importante en los aspectos económicos, ambientales y sociales de las regiones semiáridas del país.

Una de las regiones productoras más importantes en el país es el Estado de México, en la región noroeste, donde se reporta un rendimiento de 10.1 t ha⁻¹ de tuna, para una producción total 29,198.00 t en 2890 ha de extensión (Barrera, Luis, Zamora, Barreto, & López, 2011). Sin embargo, esta actividad como cualquier otra, tiene impactos sobre el medio ambiente, ya que genera diferentes tipos de residuos, tanto orgánicos como inorgánicos, los cuales no tiene manejo óptimo para su disposición final.

En la cosecha las gloquidias provenientes de la limpieza del fruto son un residuo lignoceluloso, que representa un problema para el productor, ya que no le conocen utilidad, además, tiene alta resistencia a la degradación biológica y a la quema, por lo que son vertidas a orillas de las plantaciones o en los basureros sin ningún control sanitario. Generalmente, son envasadas en bolsas de plástico antes de su disposición y, como es conocido, se trata de un material no degradable y por ello, también tiene un efecto negativo en el ambiente. De acuerdo con Suhrhoff y Scholz-

Böttcher (2016), en 2013 la producción de plástico a nivel mundial correspondió a unas 299 millones de toneladas que fueron liberadas al ambiente.

La dificultad a la degradación de las glóquidas se relaciona con la dureza de su estructura, asociada a su grado de cristalización (20-60%) y a su alto grado de alineación (1-2.5°) de las fibras de celulosa, lo cual les confieren resistencia similar o superior a materiales sintéticos como la fibra de vidrio (Martinez, *et al.*, 2017).

En la búsqueda de posibles usos de estas estructuras, el conocimiento sobre su composición y estructura, así como su contenido mineral, son determinantes. Existen algunos reportes en cuanto a la composición química del nopal para cladodios, tuna, jugo de tuna y semillas, incluyendo macro y micronutrientes (Chahdoura *et al.*, 2015; (Mustafa-Odat *et al.*, 2014), así como elementos tóxicos (Kalegowda, *et al.*, 2015); sin embargo, para las glóquidas del fruto no se han realizado estudios específicos como para darles un uso alternativo.

El problema ambiental de las glóquidas no sólo se relaciona con las bolsas de plástico que se usan para su disposición, también representan un riesgo para la salud de las personas, ya que pueden incrustarse en la piel causando diferente grado de irritación (Doctoroff, *et al.*, 2000) o lastimar los ojos (Mustafa-Odat, *et al.*, 2014).

Con base en lo anterior, se planteó el objetivo de estudiar la estructura, morfología y composición química de las glóquidas de tuna para evaluar su aprovechamiento agronómico a partir de su hidrólisis ácida o alcalina, para obtener un insumo con valor agregado, que contribuya a reducir el daño al ambiente en general y a la salud humana.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Plantear opciones de manejo integral de glóquidas de tuna, en la producción del nopal tunero, para la reducción del impacto ambiental y contribuir a la sostenibilidad del sistema de producción en San Felipe Teotitlán, Estado de México.

2.2 Objetivos específicos

1. Determinar la estructura, morfología y composición química de las glóquidas de tuna para evaluar su aprovechamiento agronómico a partir de su hidrólisis ácida o alcalina.
2. Evaluar la eficacia de la degradación química de las glóquidas a través de la hidrólisis ácida y alcalina, para la obtención de Azúcares Reductores Totales, y nutrimentos.
3. Estimar la producción de las glóquidas de tuna mediante un modelo matemático, para proyectar su impacto ambiental.
4. Evaluar el potencial agronómico de las glóquidas como fertilizante foliar a partir de su hidrolisis en la calidad de rosas, para su manejo integral.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Sistema de producción de tuna de nopal

La tuna es el fruto del cultivo de nopal, el cual forma parte importante de la cultura mexicana. El país cuenta con un alto potencial para el desarrollo de plantaciones de nopal tunero debido a la gran pluralidad climática que beneficia el crecimiento de esta especie. Actualmente, esta fruta está cobrando mayor importancia a nivel económico en el mercado internacional (Ramírez, Figueroa, & Espinosa, 2015).

En general, México presenta una extensión de plantaciones de tuna de nopal de aproximadamente 72,500 ha con un rendimiento promedio de 6 t ha⁻¹, y una producción total de 435,000 t por año (Corrales-García & Flores-Valdez, 2003). De acuerdo con Herrera García *et al.* (2003) con un buen manejo de la plantación de tuna, el rendimiento varía de 25 a 30 t ha⁻¹. Por lo que se requiere de un mejor

manejo sistema productivo de tuna para aumentar el rendimiento promedio nacional actual.

En México el cultivo de nopal tunero es realizado por 20,300 productores, por lo que es una fuente importante de empleo para las zonas marginales. El Estado de México fue el principal productor de tuna a nivel nacional, con un 43% de la producción total, para el año 2010 con un crecimiento anual de 0.8% (Ramírez *et al.*, 2015).

En la producción de tuna existen diferentes variedades. En Axapusco, Estado de México, se producen tunas blancas y rojas, en una proporción de 74% y 26%, respectivamente. Los productores prefieren producir la tuna blanca debido a que tiene una vida en anaquel más larga que la roja, además presenta un precio de venta más estable (Márquez-berber, Torcuato-calderón, Almaguer- Vargas, Colinas-León, & Khalil Gardezi, 2012). El rendimiento productivo para esta región es de 10.1 t ha⁻¹, para un total anual de 29,198 t en 2890 ha de plantación.

En el cultivo de nopal tunero entre el 25.3% y 31.6% de los costos productivos corresponden al uso de fertilizantes (Domínguez-garcía *et al.*, 2017), por lo que resulta importante implementar nuevas tecnologías en los sistemas para disminuir los costos de producción, aumentar su productividad y reducir la dependencia de insumos de nutrición vegetal externos.

En este mismo municipio, existen problemas a superar para mejorar la producción. Entre ellos se debe mencionar que entre los productores el 71% no reciben ningún tipo de asesoramiento técnico, y el 34% restante informa que en sus huertas hay presencia de daños por plagas y enfermedades (Márquez-berber, *et al.*, 2012). Al no haber intervención tecnológica en esta zona, la producción de tuna no logra optimizarse, y por lo tanto su rendimiento es inferior al potencial de rendimiento en la zona.

La productividad del sistema de producción depende directamente de las condiciones ambientales y de la tecnología que se implemente en la región, y por lo tanto el rendimiento es diferente entre zonas y entre los productores en

función de la tecnología que usen y asesoramiento que reciban. Aguilar Zamora, et al. (2008) destacan que el productor líder presenta mejores condiciones de producción, ya que tiene mano de obra asalariada y cuenta con la infraestructura y herramientas necesarias para mecanizar la producción, lo cual optimiza el sistema productivo. Dichos autores clasificaron a los productores de tuna del estado de Hidalgo en función de diversos indicadores de producción y comercialización (Cuadro 1. *Tipología de productores de tuna en el estado de Hidalgo.*).

Cuadro 1. Tipología de productores de tuna en el estado de Hidalgo.

Indicador/Categoría	Producto Básico	Productor Genérico	Productor Líder
Mantenimiento de huerta	Nulo o escaso	Escaso	Excelente
Estructura y herramientas de trabajo	Nulo o escaso	Poca infraestructura y herramientas básicas de trabajo, palas, cubetas, guantes, etc.	Cuenta con toda la infraestructura y herramientas de trabajo: maquinaria agrícola, desespinnadora, bodegas, vehículos, etc.
Mano de obra	Familiar	Familiar y asalariada	Asalariada
Modalidad de venta	Venta de la huerta en pie en periodos de 1 a 5 años	Venta a pie de huerta, a pie de carretera y en tianguis regionales de Actopan, Hidalgo y San Martín de las Pirámides, Estado de México	Venta en Centrales de abastos de Iztapalapa, Pachuca, Singuilucan, Morelia, Tijuana y Poza Rica. Venta con algunos representantes de tiendas comerciales
Cosecha y comercialización	La cosecha y comercialización la realiza el comprador		La cosecha y comercialización está a cargo del productor
Superficie* (ha)	4.1	7.0	41.3
Rendimiento* (t ha ⁻¹)	3.8	6.9	12.9

Fuente: (Aguilar Zamora *et al.*, 2008)

En la investigación de Callejas-Juárez, Matus-Gardea, García-Salazar, Martínez-Damián, & Salas-González (2009) para el Estado de México (Cuadro 2) se reportó que, la baja calidad del fruto y bajo nivel de tecnificación son una de las debilidades del sistema productivo de tuna, lo cual afecta aspectos de rendimiento y económicos; asimismo proponen una estrategia de mejora con base en un análisis FODA (Cuadro 2).

Cuadro 2. Matriz FODA del sistema productivo de tuna en el Estado de México.

FODA	Estrategia
Fortalezas (F): Gran diversidad de variedades autóctonas, climas y superficie propios para su cultivo, bajos costos de producción y alta rentabilidad y competitividad.	
Oportunidades (O): Un amplio mercado, diversidad de subproductos que pueden obtener y cercanía de las agroindustrias con las zonas de producción.	La industrialización de la tuna y el nopalito mejora el ingreso y aprovecha el exceso de oferta. Establecer un plan de mercadotecnia y comercialización. Establecer normas de calidad y certificado de origen del nopal o subproductos.
Debilidades (D): La producción de temporal, estacionalidad de la producción, baja calidad y bajo nivel de tecnificación.	
Amenazas (A): El desarrollo de la producción en otros países como China, Italia y Estados Unidos.	

Fuente: (Callejas-Juárez *et al.*, 2009).

3.2 Ciclo productivo

El ciclo productivo de la tuna de nopal es estacional, el cual requiere de la planificación de cada una de las actividades necesarias para que la plantación sea productiva en el tiempo.

La época de plantación se debe realizar entre los meses de abril y junio, justo después de la época de heladas de invierno y aprovechando así la humedad de las precipitaciones; con el objetivo de optimizar el crecimiento y desarrollo de la plantación (Herrera García *et al.*, 2003).

El 90% de la producción de tuna en México se da entre los meses de julio a septiembre en función de la variedad y región donde se encuentre la plantación (Corrales García & Flores Valdez, 2003). Estos autores también señalan que para la variedad rojo liso, la mejor época de cosecha es agosto y para la tuna Alfajayucan es de julio a agosto (Cuadro 3).

Cuadro 3. Porcentajes de cosecha mensual de las principales variedades de tuna en las regiones productoras de México.

Variedad	Región	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
Villanueva	Sur	0.27	0.65	6.77	18.50	33.24	30.24	7.28	2.88	0.16
Alfajayucan	Centro Edo. de México				10.00	40.00	45.00	5.00		
Alfajayucan	Centro Edo. de México			10.00	10.00	65.00	10.00	5.00		
Alfajayucan	Centro-Norte					50.00	50.00			
Amarilla	Centro-Norte					20.00	50.00	30.00		
Rojo liso	Centro-Norte					10.00	75.00	15.00		
Pico chulo	Centro-Norte						40.00	60.00		
Cristalina	Centro-Norte						15.00	65.00	20.00	
Burrona	Centro-Norte						15.00	55.00	30.00	
Fafayuco	Centro-Norte							15.00	60.00	25.00

Fuente: (Corrales García & Flores Valdez, 2003)

3.3 Etapas del proceso productivo

El proceso productivo del nopal tunero implica el uso de tecnologías que favorezcan el rendimiento de las plantaciones. Sin embargo, la realidad es que los productores manejan las plantaciones conforme a la experiencia propia, por lo que no existe uniformidad de criterios para aplicar las mejores tecnologías en sus huertos (Aguilar Zamora, 2003). A continuación, a nivel general se presentan las actividades del sistema de producción de tuna (Figura 1):

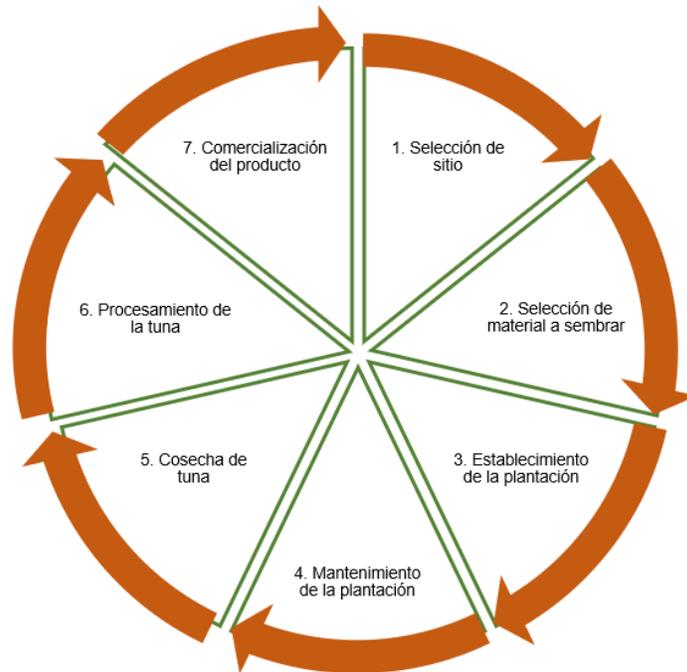


Figura 1. Etapas del proceso productivo de la tuna.

La descripción de los requerimientos y actividades necesarias en la cadena productiva de la tuna se presentan a continuación.

A. Selección de sitio

Los tipos de suelo en que se desarrolla el nopal tunero corresponden a vertisoles, luvisoles y fozem. Las huertas se establecen donde el suelo presenta pH entre sub-ácido y sub-alcalino, textura suelta (<20% arcillas) y es poco profundo (40-70 cm) con buen drenaje. Para mantener un buen rendimiento de tuna es importante asegurar la disponibilidad de nutrientes mediante la adición al suelo de estiércoles y fertilizantes químicos (Herrera García *et al.*, 2003).

En cuanto a la altitud el sitio debe encontrarse entre 800-2500 msnm en un clima semiárido, donde las temperaturas oscilen entre los 10-50°C con una baja precipitación de 300-700 mm de lluvia anual.

B. Preparación del suelo

Existen diferentes prácticas para la preparación del suelo de acuerdo con sus condiciones (Aguilar Zamora et al., 2008) (Figura 2):

- Suelos profundos: con pendientes menores al 5% se realiza un barbecho a 30 cm de profundidad y posteriormente una rastra.
- Suelos de lomerío: con >8% pendiente, realizar cepas con una anchura de 50 cm diámetro y profundidad siguiendo las curvas de nivel.
- Suelos delgados y pedregosos: son suelos con tepetate a nivel superficial. Hacer subsoleo a 50 cm profundidad.

Se recomienda que las cepas sean de 50 cm de diámetro y profundidad, a las que se deben acondicionar con una capa de estiércol o composta para que sirva como mejorador de suelo y fuente de nutrientes para la planta.

C. Selección de pencas

La selección de pencas a sembrar es la actividad más importante de la producción, ya que de ella depende el éxito o fracaso de la plantación (Figura 2). Por tanto, es necesario identificar las plantas que sean mayores a los 8 años, que estén vigorosas, con frutos de buen tamaño y libre de plagas y enfermedades. Las pencas seleccionadas y extraídas de la huerta deben ser desinfectadas con caldo bordelés (1 kg de cal+1kg sulfato de cobre diluidos en una solución de Cupravit a dosis comercial). Después de ello se deja dicho material reproductivo a la sombra por 2 semanas para posteriormente llevarlo a campo y sembrarlo; la mejor época para hacerlo es entre marzo y mayo (Aguilar Zamora *et al.*, 2008).

D. Densidad de plantación

La densidad de la plantación por lo general es de 500 plantas por hectárea con distanciamiento entre 4 a 5 metros entre hileras (Herrera García et al., 2003) (Figura 2).

E. Mantenimiento de la plantación

En un apartado que se encuentra más adelante se describe con detalle esta fase del proceso productivo.

F. Limpieza de fruto

El proceso de limpieza del fruto se puede realizar de dos formas (Aguilar Zamora *et al.*, 2008):

- Manualmente: se coloca las tunas y se cubre con paja, y se mueven los frutos con las manos. Hay mayor daño de frutos.
- Mecánicamente: máquinas desespadoras. Los frutos sufren menos daños (Figura 2).

G. Manejo pos cosecha

El manejo pos cosecha de la tuna consiste en la selección de frutos donde se separan por tamaños y se descartan aquellos que presentan daños por plagas, enfermedades o mecánicos. Estos frutos se pueden empacan en cajas de madera o plástico (Figura 2), generalmente se transportan y se almacenan cuando es necesario en ambientes bajo refrigeración para su preservación hasta que llegan al consumidor (Corrales-García & Flores-Valdez, 2003).



Figura 2. Etapas del proceso productivo de la tuna. a) Preparación del terreno, b) Selección de pencas, c) Densidad de plantación, d) Cosecha de tuna, e) Desespinado de tuna, f) Comercialización de tuna.

3.4 Técnicas de mantenimiento de una plantación de tuna

La mayoría de los productores manejan sus plantaciones conforme a la experiencia propia (sin asesoría técnica), por lo que no existe un desarrollo y rendimiento homogéneo de las plantaciones de tuna (Aguilar Zamora, 2003). Así mismo, se observa que con dicha forma tradicional de cultivar el nopal tunero los costos de producción son altos. A continuación, se mencionan los aspectos básicos para el manejo de una plantación tunera:

a. Control de malezas

Al inicio de la plantación, las malas hierbas pueden crecer entre las hileras de las pencas o bien junto a ellas, compitiendo por luz, humedad y nutrientes con la planta de nopal. Si las malezas no se eliminan a tiempo el desarrollo de la planta y el inicio de la producción generalmente se retrasa. El control de malas hierbas puede realizarse mecánicamente (con pasos de rastra o con azadón) o de forma química aplicando Paracuat a dosis de 1.5 L disueltos en 100 L de agua, evitando el contacto del herbicida con las plantas de nopal, ya que estas pueden sufrir daños (Aguilar Zamora, 2003).

b. Fertilización

Para asegurar un buen crecimiento y desarrollo de la planta es necesario adicionar nutrimentos mediante fertilizantes químicos y orgánicos, en dosis que varían con la edad de las plantaciones (Cuadro 1 Cuadro 4). Para las recién establecidas, se puede aplicar gallinaza a razón de 5.5 kg por planta, o estiércol vacuno a razón de 8.2 kg por planta (Aguilar Zamora, 2003) (Figura 3).

Cuadro 4. Dosis recomendadas de materia orgánica en plantaciones de nopal tunero.

Año	Vacuno, ovino o caprino		Gallinaza o pollinaza	
	kg planta ⁻¹	t ha ⁻¹	kg planta ⁻¹	t ha ⁻¹
1	3	1.87	1.00	0.62
2	5	3.12	2.00	1.25
3	5	3.12	2.00	1.25
4	8	5.00	3.00	1.87
5	10	6.25	4.00	2.50
A partir del 6	15	9.37	6.00	3.75

Fuente: (Corrales García & Flores Valdez, 2003).



Figura 3. Estiércol bovino en una plantación de tuna.

La dosis de fertilizante químico también varía con la edad de la plantación (Cuadro 5).

Cuadro 5. Fertilizantes químicos para nopal tunero.

Fertilizante	Plantas menores de 5 años		Plantas mayores de 5 años	
	g planta ⁻¹	kg planta ⁻¹	g planta ⁻¹	kg planta ⁻¹
Nitrogenados (sólo uno de los tres)				
Sulfato de Amonio	180.0	99.0	360.0	198.0
Urea	80.0	44.0	160.0	88.0
Nitrato de Amonio	110.0	60.5	220.0	121.0
Fosforados (sólo uno de los dos)				
Superfosfato de Ca simple	180.0	99.0	180.0	99.0
Superfosfato de Ca triple	80.0	44.0	80.0	44.0
Potasio				
Cloruro de potasio	60.0	33.0	60.0	33.0
Fórmula (con base en 550 plantas/ha: 6x3 m)	20-20-17		40-40-17	

Valores calculados por el autor con base en Fernández y Mondragón (1998). Fuente: (Corrales García & Flores Valdez, 2003).

c. Podas

La poda en plantaciones de tuna, es una práctica que la planta requiere para mantenerse bien formada, sana y siempre productiva (Figura 4). Existen cuatro tipos de poda que es necesario para la plantación (Cuadro 6).

Cuadro 6. Tipos de poda en plantación de tuna.

Tipo de poda	Descripción
Poda de formación	En el primer año de establecida la plantación, se deja crecer libremente la planta, y luego se seleccionan de dos a tres pencas bien ubicadas y se eliminan el resto. Esta práctica es necesaria para los primeros 3 años.
Poda de sanidad	Consiste en eliminar las pencas que ya no son productivas, viejas, enfermas y las que presentan algún tipo de plaga o daño. Se debe realizar en los meses de noviembre a enero; según lo demande el crecimiento de la plantación
Poda de fructificación	La fructificación se presenta en más de un 90% en pencas de seis meses de edad en adelante, por lo que es necesario eliminar las pencas que tuvieron cosechas en la temporada anterior. Se puede dejar en promedio de 35 a 40 pencas por planta.
Poda de rejuvenecimiento	Este tipo de poda aplica principalmente a plantaciones mayores de 20 años y plantaciones mal atendidas, donde la producción es pobre. Este tipo de poda promueve la brotación de pencas productivas.

Fuente: (Aguilar , 2003).



Figura 4. Tipos de podas en plantación de tuna en San Felipe Teotitlán, México: a) Poda de fructificación, b) Poda de rejuvenecimiento, y c) Poda de formación.

d. Aclareo o raleo de frutos

La práctica de ralear los frutos es de gran importancia para obtener buena calidad en la pulpa, buen tamaño, y peso en la producción. Esta práctica consiste en eliminar los frutos de las pencas que tengan demasiados, dejando entre 6 y 10 frutos por penca, se hace de forma manual (Herrera García *et al.*, 2003).

e. Adelanto de floración

Acortar el periodo a floración permite adelantar la cosecha de tuna. El logro de este objetivo se conseguía con la aplicación de fertilizante químico. Actualmente se puede lograr con la aplicación de composta (2 kg/planta) y riego (40 L agua/planta). Para que esta práctica de buenos resultados es necesario que las plantas tengan al menos 3 años de edad, estén sanas y presenten buen vigor. Esta práctica permite adelantar la floración entre 7 y 25 días (Aguilar Zamora *et al.*, 2008).

f. Plagas

En general, se desconoce la intensidad del daño que la plagas ocasionan a las plantas, su efecto en el rendimiento de la plantación y los impactos económicos (Aguilar Zamora, 2003).

El control de plagas requiere información suficiente para determinar si los insectos que se alimentan directa o indirectamente del nopal de tuna causan daños de importancia económica (Herrera García *et al.*, 2003). Asimismo, es necesario identificar correctamente la plaga (Cuadro 7) y mediante monitoreo determinar el grado de afectación de esta antes de aplicar insecticidas

Cuadro 7. Principales plagas en la producción de tuna de nopal.

Nombre común	Nombre científico
Picudo barrenador	<i>Cactophagus spinolae</i> Gyll
Picudo de las espinas	<i>Cylindrocopturus birradiatus</i> Champ
Barrenador del nopal	<i>Lanífera cyclades</i> Druce
Gusano cebra	<i>Olycella nephelepsa</i> Dyar
Chinche gris	<i>Chelinidae tabulata</i> Burm
Chinche roja	<i>Hesperolabops gelastops</i> Kirk
Mosca del nopal	<i>Dasiops bennetti</i> Mc. Alpine
Barrenador del tronco	<i>Moneilema variolare</i> TOM
Cochinilla o grana	<i>Dactylopius indicus</i> Green
Mayate verde del fruto	<i>Cotinis nítida</i>
Gallina ciega	<i>Phyllophaga</i> spp.
Chinche del fruto	<i>Narnia femorata</i> Stal
Escama del nopal	<i>Diapisis echinocacti</i> Bouché
Perforador del fruto	<i>Asphodylla opuntiae</i> Felt
Araña roja	<i>Tetranychus</i> sp.
Caracol	<i>Helix asparsa</i> Muller
Minador del nopal	O. <i>Lepidóptera</i> , F. <i>Gelechiidae</i>
Escama del cactus	<i>Opuntiaspis philococcus</i> Cock
Rata nopalera	<i>Neomatoma</i> spp.
Tuza	<i>Pappogeomys</i> sp.
Chapulín	
Mosca cobage	

Fuente: Elaborado por Corrales García y Flores Valdez (2003) con base en Hernández (1993), Villanueva (1995) y Gijón (1998).

g. Enfermedades

Las enfermedades presentes en el cultivo del nopal tunero pueden disminuir el rendimiento de frutos. Algunas de ellas son de origen fungoso, (ejemplo: la fiebre o mal de oro), bacteriana, viral o micoplasma (engrosamiento de cladodios) (Figura 5). Su control requiere primero identificar el origen de dichas enfermedades (Cuadro 8)

Cuadro 8. Principales enfermedades del nopal tunero.

Nombre común	Nombre científico
Pudrición negra	<i>Macrophomina sp.</i>
Mancha de oro	<i>Alternaria sp. Ascochita sp.</i>
Lesiones causadas por: Gomosis	<i>Fusarium solani</i> y <i>Fosarium oxysporum</i> <i>Dothiorella ribis</i>
Necrosis bacteriana	<i>Erwinia sp.</i>
Antracnosis de la penca y fruto	<i>Collectrichum gloesporoides</i>
Negrilla o fumagina	<i>Capnodium sp.</i>
Pudrición de la epidermis	<i>Poma sp.</i>
Mancha bacteriana	<i>Bacteriem sp.</i>
Agalla del nopal	<i>Agrobacterium tumefaciens</i>
Engrosamiento de los cladodios	<i>Virus o microplasmas</i>
Pudrición blanda de los cladodios	<i>Pythium sp.</i>
Mancha del café	
La carcoma del nopal	
Envejecimiento y daño fisiológico	

Fuente: Elaborado por Corrales García y Flores Valdez (2003) con base en Hernández (1993), Villanueva (1995) y Gijón (1998).

En la Figura 5 se observa los diferentes tipos de plagas y enfermedades que atacan al nopal tunero.

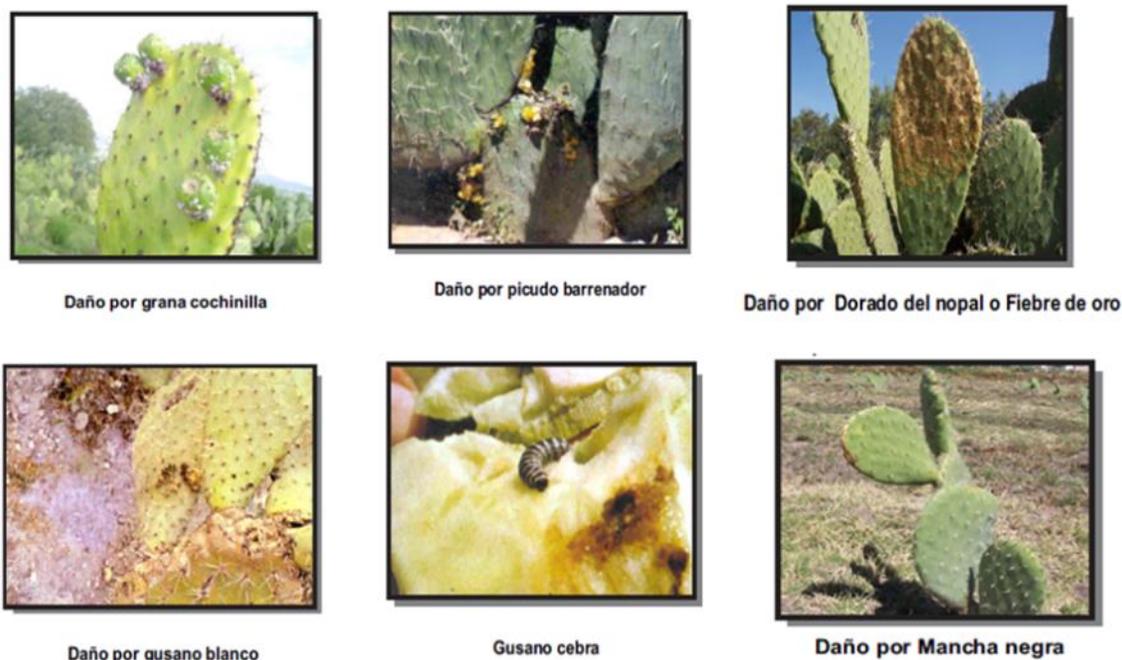


Figura 5. Principales plagas y enfermedades en la plantación de nopal tunero.

Fuente: (Aguilar Zamora *et al.*, 2008).

3.5 Impacto ambiental de la producción de tuna

En un sistema agrícola, donde pueda incluirse o no en un esquema que propicie la conservación biológica, sin dejar de ser productivo, depende en gran medida de las características propias del cultivo, el manejo cultural y la percepción ambiental de los productores, siendo esta la percepción ambiental la forma de cómo cada individuo observa, aprecia y valora su entorno (Rodríguez, 1986; Fernández Moreno, 2008). La percepción ambiental del grupo involucrado directamente con el manejo de un recurso debiera ser la base para generar modelos productivos, atractivos y funcionales, donde se integren la comunidad y el ambiente (Zaragoza González, 2014).

La producción de tuna en el Estado de México es uno de los principales productos agrícolas de las zonas semiáridas del país, pero como toda actividad antropogénica, esta genera un impacto negativo sobre el medio ambiente. En un estudio realizado en Jalisco, Guadalajara, señala que los productores agrícolas no perciben como parte de los problemas el impacto ambiental de sus actividades y consideran que sus actividades no ocasionan ningún problema grave. La única actividad propia que

identifican como problema ambiental es el uso de insecticidas. La mayoría de los productores, indicaron que estaban dispuestos a cambiar prácticas de manejo, si se les ofrecen alternativas y les brindan las capacitaciones adecuadas (Zaragoza González, 2014). Sin embargo, los productores en estas comunidades no están organizados y tampoco reciben capacitaciones técnicas para reducir el impacto de sus actividades.

Los impactos ambientales negativos de la producción de tuna son la disposición incorrecta de los residuos inorgánicos y orgánicos.

Residuos inorgánicos

El uso de agroquímicos en un sistema agrícola es importante para asegurar el rendimiento de la plantación. En la producción de tuna se aplican agroquímicos para diversas plagas y enfermedades. Silveira-Gramont *et al.* (2018), en Sonora, México, encontraron que se emplean hasta 24 productos químicos diferentes en los cultivos mediante aspersión, y aplican 211 t en 72,500 ha por temporada, los cuales son moderadamente persistentes en el medio ambiente y se consideran peligrosos para salud humana. Asimismo, los envases plásticos de los agroquímicos una vez utilizados son desechados en el medio ambiente sin ningún tipo de tratamiento (Figura 6). Esto incrementa el riesgo de contaminación de suelos, agua y aire.

Las bolsas plásticas que se usan para tirar las espinas de los frutos son residuos que también afectan al ambiente, ya que además de contribuir a un problema estético, el plástico no es biodegradable.



Figura 6. Espinas y agroquímicos generados por la actividad de tuna en San Felipe Teotitlán, Estado de México (fuente propia).

Residuos orgánicos

La generación de residuos orgánicos en la producción de tuna es el resultado del El mantenimiento de las plantaciones, mediante las podas (Figura 7) genera residuos orgánicos, los cuales representan un gran porcentaje del total. Dichos residuos son dispersados en el campo, y en algunas ocasiones dependiendo del material, este se tritura con una máquina y se dispersa en campo como fuente de materia orgánica. Sin embargo, en las podas de rejuvenecimiento el material queda en campo sin ningún tipo de tratamiento. Dependiendo del contenido de humedad puede aprovecharse como leña cuando los cladodios son viejos, ya que poseen una cutícula lignificada y numerosas fibras que le dan una consistencia casi leñosa. Su uso como combustible también ha sido documentado en algunos países de África (Sáenz, 2007).

De acuerdo con Sáenz (2007) sugiere que, los cladodios derivados de las podas no utilizadas para nuevas plantaciones o que no reúna las características deseadas para tal fin, se utilicen para la obtención de biogás, abono orgánico o para la alimentación del ganado. De esta forma el impacto ambiental por residuos orgánicos sería mínimo, ya que se reintegrarían al sistema productivo nuevamente.

Otro tipo de residuo orgánico es la espina de tuna (Figura 7), la cual genera un impacto negativo sobre el paisaje de la comunidad, ya que se emplean bolsas plásticas y se dispersan en campo. Se ha observado por los productores que las espinas derivadas de la limpieza de la tuna en el empaque, son altamente resistentes a la biodegradación, y por sus características físicas, dicho residuos es peligroso debido a que se puede incrustar fácilmente en la piel de las personas o en las mucosas expuestas, siendo los ojos y los conductos nasales los más vulnerables.



Figura 7. Residuos orgánicos en plantaciones de tuna: a) y c) Podas, b) y d) Glóquidas de tuna (fuente propia).

3.6 Composición y estructura de la espina del cladodio

La presencia de espinas en la estructura morfológica del nopal y otras cactáceas, cumplen un papel importante en la adaptación de estas, de acuerdo con Santini *et al.* (2007) disminuyen el flujo de aire, la conducción y convección del calor y la absorción de radiación de onda corta en el tallo por lo que modulan la variación de la temperatura en la superficie del mismo (Nobel 1988). Además, indica que una cubierta densa de espinas puede reducir la temperatura del clorénquima hasta en 10 °C de tal forma que incrementa las posibilidades de supervivencia y el crecimiento de la cactácea. El sombreado de las plantas por sus propias espinas varía en una misma localidad geográfica, al parecer como resultado de las condiciones micro ambientales de los sitios en donde se encuentran.

En general los individuos que crecen en lugares expuestos somborean una mayor proporción de sus tallos mediante espinas más largas que aquellos que lo hacen

entre rocas o bajo arbustos. Esto quiere decir que, al menos en algunas especies, la magnitud de la expresión fenotípica de la cubierta de espinas está influida por el ambiente lumínico en el que se establecen (Santini *et al.*, 2007).

Específicamente, la espina presenta alta resistencia a su degradación natural, por lo que genera una acumulación de este residuo en campo, de acuerdo con los productores, indican que este material se vuelve un problema al final de la temporada de tuna por la dificultad de deshacerse de este material porque es difícil de manipular. En un estudio realizado por Gindl-Altmutter & Jozef (2012) compara la estructura y las propiedades mecánicas de las espinas de los cladodios del *Opuntia ficus-indica* con la madera del abeto, y demostró que la resistencia de estas espinas es debido a diferentes factores como:

- La estructura celular por la distribución de las células dentro de la espina (Figura 8).
- Alta cantidad de lignina la cual le da la resistencia a las paredes celulares,
- Alto contenido de celulosa cristalizada (50%) de las fibras.

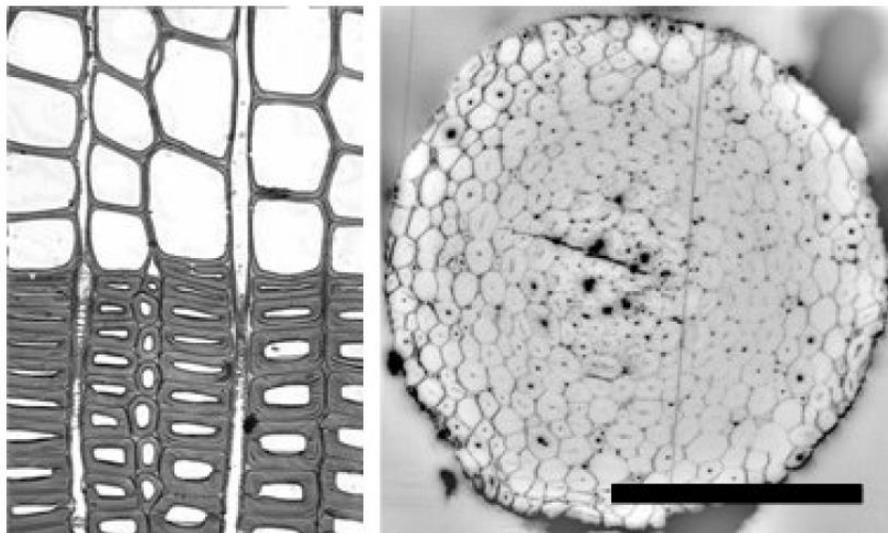


Figura 8. Estructura celular de la madera de abeto (izquierda) y de la espina del *Opuntia* a la derecha (Gindl-Altmutter & Jozef, 2012).

La espina del cladodio presenta en su composición celulosa y arabinosa prácticamente en las mismas cantidades; con una fuerte interacción en las microfibras de la espina (Figura 9). Esta relación es importante ya que junto con la distribución de éstas en las espinas explica su alta resistencia en cuanto a las propiedades físico-químicas (Vignon *et al.*, 2004).

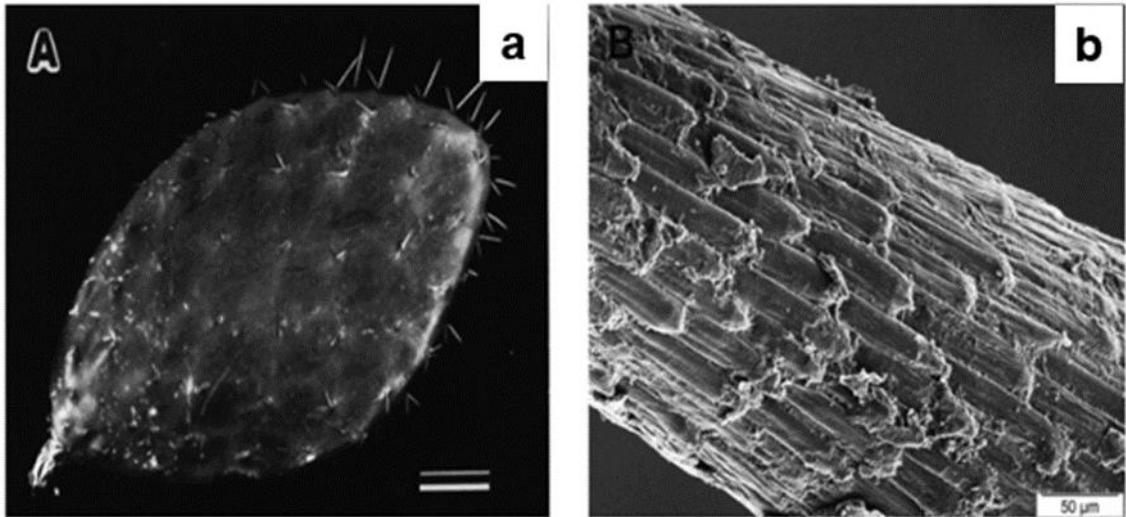


Figura 9. Espina del cladodio de nopal, a) Cladodio, b) Estructura externa de la espina (Malainine *et al.*, 2003).

El investigador Robinson (1974) realizó diferentes fotografías de glóquidas de diferentes especies de cactáceas donde se observan claramente como son las estructuras externas de estas (Figura 10).

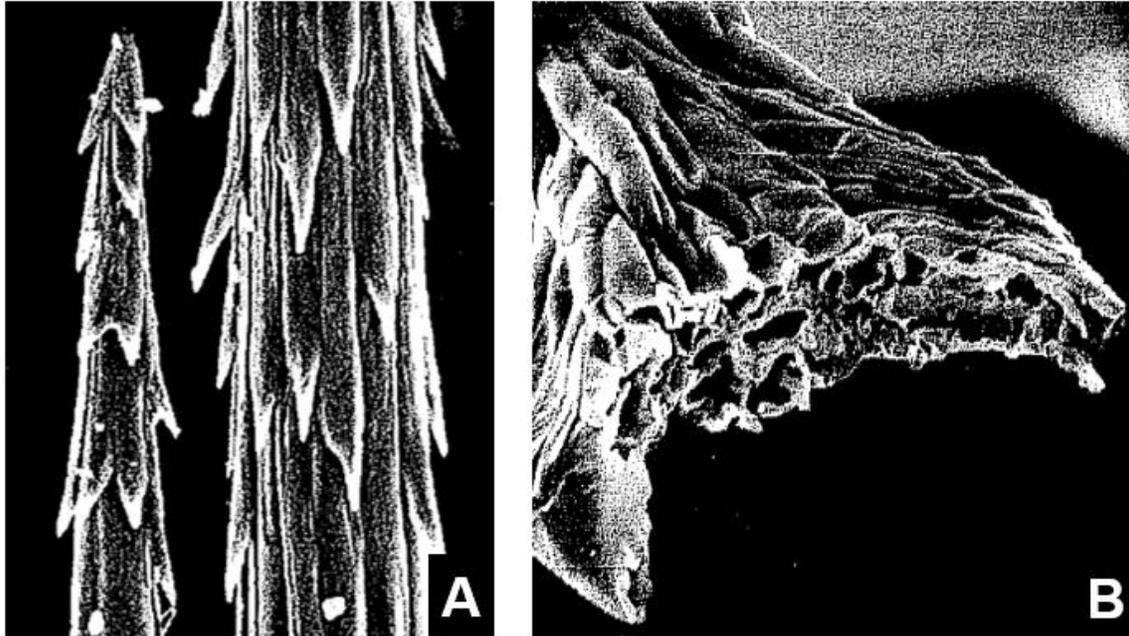


Figura 10. Estructura externa de las glóquidas. a) Barbas retrorsa de la glóquida, b) Parte basal de las glóquidas (Robinson, 1974).

3.7 Técnicas de degradación de materiales orgánicos

Las glóquidas de tuna presentan alta resistencia a la degradación natural, debido a su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, compuestos unidos por enlaces covalentes, diversos puentes intermoleculares y fuerzas de Vander Waals (Kumar, Singh, & Singh, 2008), además de que poseen una conformación cristalina en su estructura. Por ello el pretratamiento es necesario para facilitar la hidrólisis (Medina-Morales, Lara-Fernández, Aguilar, & de la Garza-Toledo, 2011). Dicho pretratamiento promueve la generación de regiones amorfas en la celulosa, las cuales son más susceptibles a la hidrólisis (Hu & Wen, 2008). En el Cuadro 9 se presentan algunos ejemplos para tratar previamente el material celulítico a hidrolizar.

Cuadro 9. Pretratamientos para hidrolizar el material celuloso.

Métodos	Procedimientos
Pulverizado mecánico	Molienda
Pirólisis	Temp. > 300°C
Explosión a vapor	Vapor saturado a 160 – 260°C, p= 0.69 – 4.85 MPa por unos segundos o minutos y liberación de presión hasta presión atmosférica
Agua líquida caliente	Agua caliente a presión T= 170 – 230°C 1 – 46 min
Explosión de fibra con amoníaco	1 – 2 kg de amoníaco/kg de material seco 90°C/30 min
Explosión con CO2	4 kg de CO2/kg de material p= 5.62 MPa
Ozonólisis	Ozono a temperatura y presión ambiente
Hidrólisis con ácido diluido	H ₂ SO ₄ , HCl, HNO ₃ 1 – 5% (T= 120 – 160°C 1, MPa
Hidrólisis con ácido concentrado	H ₂ SO ₄ 10 – 30%, ácido peracético 21 – 60% (T= 170 – 190°C)
Hidrólisis alcalina	NaOH diluido 24h/60°C
Organosolventes	Solventes orgánicos y su mezcla con 1% H ₂ SO ₄ y HCl

Fuente: (Medina-Morales *et al.*, 2011).

A continuación, se presenta la revisión de literatura que fue útil para el diseño de hidrólisis del presente estudio. La hidrólisis se emplea para la obtención de azúcares reductores y puede ser ácida o alcalina.

Hidrólisis ácida

La hidrólisis ácida es un proceso que permite, a partir de material lignocelulósico, obtener diferentes compuestos, por ejemplo, azúcares fermentables y compuestos fenólicos, entre otros. Para esto, es necesario tratar el material a degradar con un reactivo ácido a una determinada concentración y temperatura en tiempo definido. Los reactivos más comunes para este proceso son: H₃PO₄, H₂SO₄ y HCl. Las condiciones de concentración y temperatura son variables. El resultado de este proceso es una fracción líquida, rica en azúcares fermentables y una fracción sólida compuesta principalmente de celulosa y lignina (Morales, 2015).

Un ejemplo aplicado a materiales lignocelulósicos es el estudio realizado por Aguilar-Rivera & Canizales-Leal, (2004), quienes evaluaron la hidrólisis ácida del residuo de la cascarilla de la cebada en la producción de cerveza. Encontraron que la mayor producción de azúcares reductores totales (ART) de este material, se registró a 110 °C en 210 minutos. También estudiaron el efecto de diferentes concentraciones de H₂SO₄ (0.5, 1.0 y 1.5%). El punto máximo de conversión a ART (70.83%) bajo estas condiciones se alcanzó a una temperatura de 110 °C en un tiempo de 210 minutos con una concentración de H₂SO₄ de 1%.

El rendimiento de la hidrólisis y la velocidad del proceso dependen de muchos factores, entre otros del pH, la temperatura, la concentración de biomasa hidrolítica, el tipo de materia orgánica y el tamaño de partícula del material a degradar (Domínguez-Domínguez, Álvarez-Castillo, Granados-Baeza, & Hernández-Campos, 2012). En otro estudio (Gómez Trovar, 2008) realizado sobre este proceso con ácido sulfúrico, se obtuvo el mayor porcentaje de conversión a ART (4.5%) a una concentración de ácido de 16%, a 75 °C durante 60 minutos. Además, se determinó que las mejores condiciones de reacción para la hidrólisis del bagazo de caña de azúcar fueron al que se le aplicó un pretratamiento con ácido fosfórico en solución acuosa del 60%, a 50°C durante 120 minutos.

Qiu et al., (2017) indica que el uso de H_2O_2 como pretratamiento permite obtener mayor cantidad de celulosa y hemicelulosa, además de degradar la lignina y su estructura cristalinizada. Consecuentemente vuelve más efectivo el proceso de hidrólisis. En este caso el material hidrolizado fue paja de trigo con H_3PO_4 .

Hidrólisis alcalina

El tratamiento alcalino es capaz de separar tanto la hemicelulosa como la lignina, sin tener grandes efectos sobre los demás componentes. Los reactivos más utilizados son NaOH, NH_3 , CaO y $Ca(OH)_2$, y a diferencia de los tratamientos ácidos, no necesitan temperaturas tan altas, aunque si por lo general, necesitan tiempos más prolongados de reacción, además no degradan tanto los azúcares. El uso de un álcali provoca la degradación del éster y cadenas laterales alterando la estructura de la lignina. De esta manera se provoca una pérdida de la cristalinidad de la celulosa y la solvatación parcial de la hemicelulosa. Sin embargo, este tratamiento tiene como desventaja, que algunas bases se convierten a sus sales no pudiendo recuperarlas y algunas de estas sales pueden quedar incorporadas en la biomasa en el proceso del tratamiento (Morales, 2015). Para el caso del NaOH puede reducir el contenido de lignina del material lignoceluloso en un 15% en promedio (Cardoso et al., 2016).

Otros reactivos factibles de utilizarse a nivel industrial en el tratamiento previo a la hidrólisis (Cuadro 10 y Cuadro 11) son el peróxido de hidrógeno alcalino (H_2O_2) y el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), los cuales tiene la ventaja de no dejar residuos en la

biomasa, ya que se degradan en oxígeno y agua. Además, la formación de productos secundarios es prácticamente inexistente (Rabelo, Filho, & Costa, 2008). En este estudio realizado con bagazo de caña se encontró que empleando estos pretratamientos se incrementó la producción de glucosa.

Cuadro 10. Azúcares Reductores Totales (ART) y rendimientos de glucosa después de la hidrólisis del bagazo pre-tratado [cribado (S) y no cribado (NS)] con H₂O₂.

Prueba	Tiempo (h)	T (°C)	H ₂ O ₂ (%)	ART (NS; mg g ⁻¹)	Glucosa (NS, mg g ⁻¹)	Glucosa (NS) % Rendimiento	ART (S; mg g ⁻¹)	Glucosa (S; mg g ⁻¹)	Glucosa (NS) % Rendimiento
1	6	20	1	206.2	64.6	14.5	259.0	103.3	26.9
2	24	20	1	211.5	79.7	17.9	253.5	98.1	25.6
3	6	60	1	433.0	215.3	48.3	342.4	166.7	43.5
4	24	60	1	280.7	121.4	27.3	340.3	181.9	47.4
5	6	20	5	347.0	241.9	54.3	368.0	239.3	62.4
6	24	20	5	494.7	309.3	69.4	452.1	228.1	59.5
7	6	60	5	364.9	252.5	56.7	288.9	188.8	49.2
8	24	60	5	407.0	287.7	64.6	285.5	163.4	42.6
9	15	40	3	359.0	229.6	51.5	309.4	167.6	43.7
10	15	40	3	323.5	209.2	47.0	346.5	195.2	50.9
11	15	40	3	323.9	204.6	45.9	307.1	164.9	43.0
			Promedio	341.0	201.4	45.2	323.0	172.5	45.0

Fuente: (Rabelo et al., 2008)

Cuadro 11. Rendimientos de los Azúcares Reductores Totales (ART) y glucosa después de la hidrólisis del bagazo pre tratado (cribado (S) y no cribado (NS)) con Ca (OH)₂.

Prueba	Tiempo (h)	T (°C)	Carga de Ca (g/g)	ART (NS; mg g ⁻¹)	Glucosa (NS, mg g ⁻¹)	Glucosa (NS) % Rendimiento	ART(S; mg g ⁻¹)	Glucosa (S; mg g ⁻¹)	Glucosa (NS) % Rendimiento
1	12	60	0.10	306.3	128.2	28.8	422.7	208.4	54.3
2	36	60	0.10	433.9	232.2	52.1	481.8	235.6	61.4
3	12	70	0.10	351.5	161.0	36.1	474.8	329.0	85.8
4	36	70	0.10	427.7	228.1	51.2	549.3	335.5	87.5
5	12	60	0.40	379.6	108.2	24.3	516.3	212.3	55.4
6	36	60	0.40	307.1	106.1	23.8	550.6	331.5	86.4
7	12	70	0.40	268.6	110.0	24.7	456.3	177.6	46.3
8	36	70	0.40	554.2	296.9	66.7	528.4	171.9	44.8
9	24	65	0.25	535.0	224.9	50.5	484.0	265.9	69.3
10	24	65	0.25	530.0	213.4	47.9	490.1	265.6	69.2
11	24	65	0.25	531.2	223.2	50.1	502.4	260.9	68.0
			Promedio	420.5	184.7	41.5	496.1	254.0	66.2

Fuente: (Rabelo et al., 2008)

En un estudio sobre hidrólisis alcalina, se trabajó con espigas de las pencas del nopal tunero donde se utilizó 0.5 M NaOH como reactivo en 500 mL de solución a 80 °C durante 2 horas, se obtuvo que un 50.7% es glucosa y un 48.8% es arabinosa. Durante este proceso explica que las pectinas fueron solubilizadas conforme se incrementaba la arabinosa (Vignon et al., 2004).

Algunos estudios realizados con la hidrólisis ácida y alcalina se resumen en el

Cuadro 12:

Cuadro 12. Tratamientos utilizados en diferentes residuos lignocelulósicos para su hidrólisis.

Fuente	Objetivo	Reactivo	Concentración (%)	T (°C)	Tiempo (min)	Resultados
Aguilar-Rivera & Canizales-Leal, (2004)	Evaluar la hidrólisis ácida para utilizar el residuo como complemento en la alimentación del ganado.	H ₂ SO ₄	1	110	210	Azúcares fermentables totales (70.43 %).
Domínguez-Domínguez et al., (2012)	Evaluar el proceso de hidrólisis para la producción de etanol a partir del bagazo.	H ₂ SO ₄	16	75	60	El mayor porcentaje de conversión a azúcares reductores obtenido fue 4.54%, donde la condición más favorable para llevar a cabo la hidrólisis ácida a temperaturas altas.
Mussatto, Dragone, Fernandes, Rocha, & Roberto, (2006)	Evaluar el mejor proceso de hidrólisis (ácida y alcalina) para utilizar los residuos sólidos en tejidos, papel, entre otros.	NaOH	2	120	90	Se concluye con este trabajo que un proceso secuencial de hidrólisis ácida e hidrólisis alcalina es capaz de promover una eficiente liberación de las fibras de celulosa del bagazo de malta.
		H ₂ SO ₄		120	17	
Alamilla-beltrán, Gutiérrez-lopez, Terres-rojas, & Solorza-, (2016)	Obtener fibras modificadas con alto contenido de celulosa a partir de fibras nativas de A. salmiana, para utilizarlo en la industria de alimentos como fibra o como material para la obtención de empaques biodesintegrables.	HCl	2	60	120	Existe un efecto de hidrólisis sobre la celulosa, debido a la presión y temperatura aplicada en el material.
		H ₂ SO ₄	4	130	90	
		NaOH	5	70	90	
Tejada, Quintana, Pérez, & Young, (2011)	Se analizó la hidrólisis por vía ácida y enzimática de los residuos de jardín, con el fin de obtener jarabes glucosados para su posterior conversión en etanol.	H ₂ SO ₄	5	125	15	Se obtuvo una mayor conversión con la hidrólisis ácida de todas las muestras (entre 10 y 30g/L de glucosa).
Qiu et al., (2017)	Evaluar el potencial del tratamiento previo de PHP en la promoción de la carga sólida en la paja de trigo.	Pretratamiento H ₂ O ₂	1.9	40.2	2.9	Con este pretratamiento se logró obtener el 100% de conversión de celulosa en glucosa.
		H ₃ PO ₄	79	40.2	2.9	
Cardoso et al., (2016)	Evaluar la la digestibilidad del glucano y el xilano de la paja de trigo después de un tratamiento previo con una solución de hidróxido de sodio (NaOH).	NaOH	10	50-100	60	El contenido de lignina decrece en un 14.5% and 15.6%.
Rabelo et al., (2008)	Evaluar la influencia del tiempo de pretratamiento, temperatura, y la concentración del agente de tratamiento previo en el desempeño de hidrólisis enzimática posterior en bagazo de caña de azúcar	Pretratamiento H ₂ O ₂	5	20	24	Se obtuvo un 62% de rendimiento en la obtención de glucosa.
		Pretratamiento Ca (OH) ₂	0.10 (g/g)	70	36	Se obtuvo un 87% de rendimiento en la obtención de glucosa.

3.8 Azúcares Reductores

Los azúcares reductores (todos los monosacáridos), son aquellos que pueden ser oxidados por agentes débiles, ya que la reacción sólo se produce con azúcares que pueden revertir a la forma de cadena abierta (McKee & Mc Kee, 2009).

Los azúcares, como moléculas dentro de la planta, tiene un papel importante ya que, generan cambios en la expresión de genes y modulan diversos procesos fisiológicos. Además, permiten que la planta pueda realizar diferentes procesos metabólicos relacionados con el desarrollo de planta, raíces, plástidos, fruto, semillas y embrión, asimismo con la floración y respuesta al estrés.

Los azúcares son sintetizados en la planta gracias al proceso de la fotosíntesis y son movidos mediante la ruta apoplástica, que se caracteriza porque viajan por el floema, donde se liberan al espacio intercelular de las células que forman los órganos de demanda (Figura 11). En este caso, la cantidad de azúcares que dichas células asimilen dependerá de la actividad de los transportadores ubicados en la membrana plasmática. La sacarosa que se descarga en el apoplasto puede ser incorporada por las células del tejido de demanda mediante un transportador específico y/o puede ser hidrolizada por la invertasa de la pared celular (Padilla Chacón & Martínez Barajas, 2007).

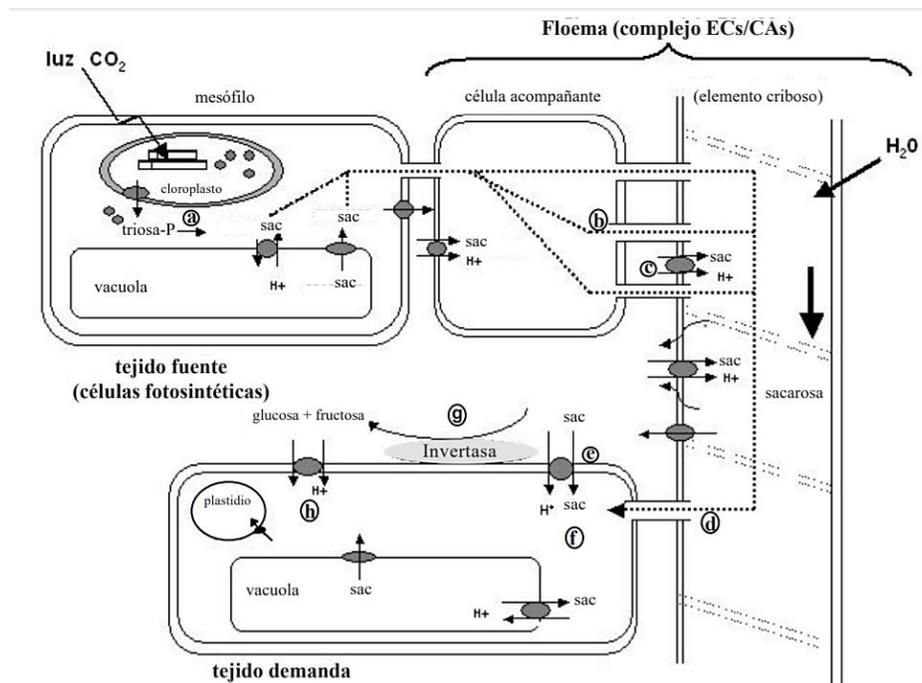


Figura 11. Ruta de fotosintatos desde el tejido fuente hacia el tejido demanda. (a). Mecanismos de carga y descarga del floema vía simplasto, (b, d) Mecanismos de carga y descarga vía apoplasto (c, e). La sacarosa puede ser incorporada por un transportador (H^+ /sacarosa) (f). Hidrolisis por invertasa de pared (g). Los productos glucosa y fructosa son incorporados por transportadores (H^+ /hexosa) (Padilla Chacón & Martínez Barajas, 2007).

En un estudio realizado por Carrillo-Mendoza *et al.*, (2005), se determinó el efecto de la fertilización foliar con urea y sacarosa en plantas de fresa en vivero, donde se encontró que la aplicación de estos tratamientos aumentó el vigor de las plantas hijas de fresa, medido en la materia seca de raíces, tallos, hojas e inflorescencias de plantas hijas.

ARTÍCULO 1: ESTRUCTURA, MORFOLOGÍA Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE GLÓQUIDAS DE TUNA PARA USOS POTENCIALES EN AGRONOMÍA

STRUCTURE, MORPHOLOGY AND CHEMICAL COMPOSITION OF TUNA GLÓQUIDES FOR POTENTIAL USES IN AGRONOMICS

Alonso Ulloa-Leitón¹, M. Edna Álvarez-Sánchez*¹, Cecilia García-Osorio², Francisco Gavi-Reyes³ y Ranferi Maldonado-Torres¹

¹ Universidad Autónoma Chapingo, Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Departamento de Suelos, Chapingo, México

^{2, 3}. Colegio de Postgraduados, Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Fruticultura; Posgrado en Hidrociencias, Montecillo, México.

*Autor para correspondencia (edna_alvarez30@yahoo.com.mx)

RESUMEN

Las glóquidas de la tuna es un residuo orgánico que se deriva del beneficiado del fruto previo a su comercialización. Este residuo se desecha en bolsas plásticas a la orilla de plantaciones o en basureros no regulados donde se acumula debido a su alta resistencia a la degradación natural y a la combustión. El objetivo de la presente investigación fue estudiar la estructura, morfología y composición química de las glóquidas de tuna para evaluar su aprovechamiento como insumo con valor agregado a partir de su hidrólisis ácida o alcalina. La estructura externa de las glóquidas se observó por MEB (Microscopio Electrónico de Barrido) y se encontró que poseen barbas retrorsas. Las dimensiones de las glóquidas en cortes transversales y longitudinales en microscopio son de $67.3 \pm 9.56 \mu\text{m}$ y $1667 \pm 292 \mu\text{m}$, respectivamente. Los análisis químicos indicaron que su composición estructural es 41.15% celulosa, 41.20% hemicelulosa y 5.27% lignina (± 0.2); y su densidad de 0.157 g mL^{-1} . Los mayores porcentajes de degradación y obtención de azúcares reductores totales se obtuvieron a partir de la hidrólisis con ácido Sulfúrico, Ácido Fosfórico e Hidróxido de Potasio. Esta información se comparó con soluciones nutritivas comerciales y se determinó que tiene gran potencial para su uso como fertilizante foliar en cultivos agrícolas.

Palabras clave: *Opuntia ficus-indica*, glóquidas, hidrólisis, Azúcares Reductores Totales.

SUMMARY

The prickly pear is an organic waste that is derived from the benefit of the prickly pear for sale and accumulates due to its high resistance to both natural degradation and combustion, which are discarded in plastic bags at the edge of the plantations or in unregulated dumps. The objective of this research was to study the structure, morphology and chemical composition of prickly pear glochids to assess their use as an input with added value. The external structure of the glochids was observed by SEM and it was found that they have back beards. In the optical microscope it was observed that the transverse and longitudinal sections are $67.3 \pm 9.56 \mu\text{m}$ and $1667 \pm 292 \mu\text{m}$, respectively. Chemical analyzes indicate that its structure is composed of 41.15% cellulose, 41.20% hemicellulose and 5.27% lignin (± 0.2); and its density is 0.157 g mL^{-1} . In determining the total reducing sugars, from the hydrolysis with different methods using alkaline acids and bases, the highest content (41.48 mg g^{-1}) was obtained with sulfuric acid. This information was compared with commercial nutrient solutions and was determined to have great potential for use as a foliar fertilizer in agricultural crops.

Index words: *Opuntia ficus-indica*, glochids, hydrolysis, Total Reducing Sugars

INTRODUCCIÓN

La producción de tuna representa una fuente importante de ingresos económicos para los productores de las regiones semiáridas de México, ya que por cada peso invertido en la producción de tuna los productores obtienen \$ 3.16 de ganancia (Callejas-Juárez, *et al.*, 2009). Desafortunadamente, dicha actividad genera impactos negativos sobre el ambiente. Después de la cosecha, los frutos son procesados para eliminar las glóquidas, popularmente conocidas como espinas.

Este subproducto es un problema para el productor, ya que no le conocen utilidad, además, tiene alta resistencia a la degradación biológica y a la quema, por lo que son vertidas a orillas de las plantaciones o en los basureros sin ningún control sanitario. Generalmente, son envasadas en bolsas de plástico antes de su disposición y, como es conocido, se trata de un material no degradable y por ello, también tiene un efecto negativo en el ambiente. De acuerdo con Suhrhoff y Scholz-Böttcher (2016), en 2013 la producción

de plástico a nivel mundial correspondió a unas 299 millones de toneladas que fueron liberadas al ambiente.

La dificultad a la degradación de las glóquidas se relaciona con la dureza de su estructura, asociada a su grado de cristalización (20-60%) y a su alto grado de alineación (1-2.5°) de las fibras de celulosa, lo cual les confieren resistencia similar o superior a materiales sintéticos como la fibra de vidrio (Martínez, *et al.*, 2017). Gindl-Altmutter & Jozef (2012) compararon la estructura y las propiedades mecánicas de las espinas de los cladodios del *Opuntia ficus-indica* con la madera de abeto, y encontraron que la resistencia de estas espinas se debe a la estructura celular y la alta alineación y cristalización (50%) de las fibras de celulosa, el porcentaje de lignina también contribuye a la resistencia de la pared celular. La pared de las células de la madera tiene 50% de celulosa, 25% de lignina y el resto es material no estructural; en contraste, las paredes de las células de las espinas de *Opuntia* están formadas por 50% de celulosa y el resto por arabinosa (Gindl-Altmutter & Jozef, 2012).

En la búsqueda de posibles usos de estas estructuras, el conocimiento sobre su composición y estructura, así como su contenido mineral, son determinantes. Existen algunos reportes en cuanto a la composición química del nopal para cladodios, tuna, jugo de tuna y semillas, incluyendo macro y micronutrientes (Chahdoura *et al.* (2015); Mustafa-Odat *et al.* (2014)), así como elementos tóxicos (Kalegowda, *et al.*, 2015); sin embargo, para las glóquidas del fruto no se han realizado estudios específicos como para darles un uso alternativo.

El problema ambiental de las glóquidas no sólo se relaciona con las bolsas de plástico que se usan para su disposición, también representan un riesgo para la salud de las personas, ya que pueden incrustarse en la piel causando diferente grado de irritación (Doctoroff, *et al.*, 2000) o lastimar los ojos (Mustafa-Odat, *et al.*, 2014). La relevancia del peligro de salud que estas estructuras representan ha motivado el estudio de las heridas que pueden provocar (Dieter, Whitehouse, & Gulliver, 2017) y la documentación de los métodos para su eliminación de la piel cuando no están enterradas (Ford, *et al.*, 2019), es decir, antes de llegar a procedimientos quirúrgicos. También existe documentación para

el caso de que ya no estén visibles para su extracción así como los procedimientos de detección previa (Yousef, *et al.*, 2017).

Con base en lo anterior, se planteó el objetivo de estudiar la estructura, morfología y composición química de las glóquidas de tuna para evaluar su aprovechamiento agronómico a partir de su hidrólisis ácida o alcalina para obtener un insumo con valor agregado, que contribuya a reducir el daño al ambiente en general y a la salud humana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Colecta de glóquidas

El área de muestreo fue la zona tunera de Nopaltepec que se encuentra a 19°47'51.05'' latitud N y 98°40'47.95''O. En esta zona se recolectó el material de las máquinas de beneficiado de la tuna de los talleres de los ejidatarios de la comunidad de San Felipe Teotitlán.

Estructura externa de las glóquidas

La muestra contenida en un tamiz se lavó con agua destilada para eliminar residuos orgánicos y polvo. El material limpio se colocó durante cinco minutos en un equipo QUORUM - Q150 ES (“*sputter*”) para cubrir las glóquidas con oro y poder ser observadas a diferentes magnificaciones en el equipo de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB, modelo JSM-6390).

Determinación de celulosa, hemicelulosa y lignina

Para determinar el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de las glóquidas, primero se secó la muestra a 40°C por tres días. Una vez seca se molió hasta pasar por malla 40. Seguidamente se determinó la composición de la pared celular de las glóquidas conforme al método de Van Soest, Robertson, & Lewis (1991), con soluciones Detergente Neutro (FDN) y Detergente Ácida (FDA).

Rendimiento de la hidrólisis

En este proceso se usó una muestra de glóquidas secas y tamizadas como se indicó en el apartado anterior. Se evaluó el rendimiento de diferentes tipos de hidrólisis (Cuadro 13) con base en: azúcares reductores totales, Grados Brix (°Bx), pH y conductividad eléctrica de la solución; asimismo, el porcentaje de degradación de las glóquidas considerando los

sólidos que quedaron en el papel filtro. En un apartado siguiente se describe el procedimiento para la determinación de azúcares reductores.

Cuadro 13. Tratamientos aplicados para la obtención de azúcares reductores.

Tratamiento	Solución	Concentración	Relación (g material/mL disolución)	Pre-digestión (horas)	Baño María (°C en 1 hora)	Agitación (horas)	Neutralización (mL)
1	H ₂ SO ₄	15%	1:30	24	60	3	57 KOH 40%
	H ₂ SO ₄	15%	1:30	24	n/a	3	48 KOH 50%
2 g material + 60 ml disolución							
2	H ₃ PO ₄	15%	1:30	24	60	3	36 KOH 40%
	H ₃ PO ₄	15%	1:30	24	n/a	3	28 KOH 50%
2 g material + 60 ml disolución							
3	NAOH	15%	1:30	24	60	3	29
	NAOH	15%	1:30	24	n/a	3	28
2 g de material + 60 mL disolución							
4	H ₂ O ₂	10%	1:20	n/a	n/a	6	1 gota
							KOH 20%
3 g material + 60 ml disolución							
5	Ca(OH) ₂	0.925 g / 500 ml	2:50	n/a	60	6	1 gota
	Ca(OH) ₂	0.925 g / 500 ml	2:50	n/a		6	1 gota
2 g de material + 50 ml disolución							
6	PHP	(79% H ₃ PO ₄ +)	1:10	24	40	3	12
	PHP	2%h ₂ O ₂) al 10%	1:10	24	n/a	3	16
3 g de material + 30 ml de disolución							
7	KOH	15%	1:30	24	60	3	13
	KOH	15%	1:30	24	n/a	3	13
2 g material + 60 ml disolución							
8	Ca(OH) ₂	10%	2:50	n/a	60	6	15
							HNO ₃ 30%
2 g de material + 50 ml disolución							

Notas: Valor de referencia obtenido en la revisión bibliográfica. Tratamiento 1 y 2: (Domínguez-Domínguez, et al., 2012); Tratamiento 3: (Tejeda, et al., 2011). Tratamientos 4 y 5: (Rabelo, *et al.*, 2008), Tratamiento 6: (Qiu *et al.*, 2017).

Después de la agitación de la solución producto de la hidrólisis, las soluciones resultantes se sometieron a baño María, conforme se especifica en el método. La neutralización de las soluciones se realizó posterior a este proceso. Las soluciones resultantes se pasaron por papel de rápida filtración. En cada caso, los sólidos retenidos en el papel, junto con este, se secaron a 45°C durante 12 horas y finalmente se determinó el peso seco de dichos sólidos.

Tratamiento 1: Ácido Sulfúrico (H₂SO₄). La neutralizaron se hizo con Hidróxido de potasio (KOH) a razón de 57.1 y 48.2 mL al 40% y 50% de concentración para el tratamiento 1.1 y 1.2, respectivamente. Las soluciones resultantes se pasaron por papel de rápida filtración.

Tratamiento 2: Ácido Fosfórico (H_3PO_4). Aquí la neutralización se consiguió de forma similar al tratamiento anterior, pero con 35.9 mL y 28 mL en los tratamientos 2.1 y 2.2, respectivamente.

Tratamiento 3: Hidróxido de Sodio (NaOH). La neutralización se realizó con ácido nítrico (HNO_3) al 50% de concentración, agregando 29.4 y 28.5 mL para los tratamientos 3.1 y 3.2, respectivamente.

Tratamiento 4: Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2). La neutralización a pH 7 se hizo mediante la adición de una gota de Hidróxido de potasio (KOH) al 20%.

Tratamiento 5: Hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) al punto de solubilidad. Al finalizar la agitación, las soluciones resultantes se pusieron en un baño frío y luego se neutralizaron con una gota de Ácido Nítrico al 30%.

Tratamiento 6: Disolución “PHP”. La neutralización a pH 7 se consiguió con KOH al 20% aplicando 12.2 mL para el tratamiento 6.1 y 16.1 mL para el tratamiento 6.2.

Tratamiento 7: Hidróxido de Potasio (KOH). En la neutralización se usaron 13.2 mL de Ácido Nítrico (HNO_3) al 30% de concentración en ambos tratamientos (7.1 y 7.2).

Tratamiento 8: Hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) al 10%. En este caso la neutralización se hizo con una gota de Ácido Nítrico al 30%.

Determinación de los azúcares reductores totales

Este proceso se hizo en la solución resultante de la hidrólisis de acuerdo con la técnica DNS propuesta por Miller (1959) y modificada por Gómez -Trovar, (2008), usando glucosa como estándar. Para obtener la curva de calibración se realizaron pruebas preliminares para ver el rango lineal de la curva y cumplir con la Ley de Lambert y Beer por lo que se partió de una solución cuya concentración de glucosa fue de $585 \mu g mL^{-1}$, la cual se diluyó a diferentes volúmenes para obtener diferentes concentraciones (Cuadro 14) con un volumen total de $1000 \mu L$.

Cuadro 14. Curva de calibración para la determinación de azúcares reductores.

Muestra	Concentración ($\mu\text{g/mL}$)	Solución (μL)	Volumen H_2O (μL)	Volumen total (μL)
Blanco	0.0	0	1000	1000
1	58.5	100	900	1000
2	175.5	300	700	1000
3	292.5	500	500	1000
4	409.5	700	300	1000
5	526.5	900	100	1000
6	585.0	1000	0	1000

La preparación de 100 mL de la disolución DNS consistió en disolver por separado cada uno de los reactivos empezando por el Hidróxido de Sodio (1.4 g), luego fenol (0.558 g), metasulfito (0.49 g), Tartrato de sodio y potasio (2.9 g) y ácido 3-5 Dinitrosalicílico (1.0 g) y después se añadieron al mismo recipiente del DNS, en agitación constante, dejando al final el ácido 3-5 Dinitrosalicílico y se agitó durante 30 minutos más. Después de realizar el procedimiento anterior la disolución se aforó a 100 mL y se pasó a un recipiente de vidrio color ámbar. El frasco con la disolución se cubrió con papel aluminio y se refrigeró a 4°C.

Se tomaron 1000 μL de cada punto de la curva y se les adicionaron 1000 μL a cada uno de la disolución DNS y se colocaron en baño María durante 5 minutos, posteriormente se pusieron en un baño frío para detener la reacción. Para las muestras se siguió el mismo proceso.

Se utilizó el espectrofotómetro Genesys 10 uv para leer la absorbancia a 540 nm de cada uno de los puntos de la curva y muestras.

Determinación del contenido nutrimental de las glóquidas

El contenido de macro nutrientes (N, S, P, K, Ca y Mg) y micro nutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn, B y Si) se determinó mediante digestión ácida con Ácido Nítrico: Ácido perclórico (rel 4:2 , v:v) de las glóquidas y con lecturas en el espectrofotómetro de absorción atómica y el del nitrógeno total por el método de micro-Kjeldahl (Alcántar & Sandoval, 1999).

La concentración de nutrimentos en solución resultante de la hidrólisis de las glóquidas se determinó directamente mediante su lectura en el espectrofotómetro de absorción atómica. Se usaron las soluciones producto de tres tratamientos de hidrolisis con mayor porcentaje de degradación (indicadas en el apartado anterior).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estructura externa de las espinas de tuna

Mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) se observó que las glóquidas tienen barbas retrorsas, también reportado por (Scheinvar y Olalde, 2014), a lo largo de toda su estructura (Figura 12). La longitud de espinas es de $1667 \pm 292 \mu\text{m}$ y su diámetro de $67.3 \pm 9.56 \mu\text{m}$. Además, se observó que las espinas después de ser molidas y tamizadas en malla 40 no se pulverizaron, sólo quedaron trozadas por este proceso (Figura 13).

La estructura externa de los glóquidas del presente estudio es similar a la de otras especies de *Opuntia* conforme a lo reportado en la literatura (Gallegos y Scheinvar (2014); Scheinvar y Olalde (2014); Scheinvar *et al.* (2015)). Conocer la estructura de las espinas permitirá encontrar algún uso a ellas. Se menciona que además de la defensa que confieren a las plantas, las espinas también ayudan a regular la temperatura y a captar el agua de niebla debido a sus barbas retrorsas (Crofts & Anderson, 2018).

El reto será como usar estas estructuras naturales o mediante bio-mímica crear unas artificiales para beneficio de las necesidades y actividades humanas.

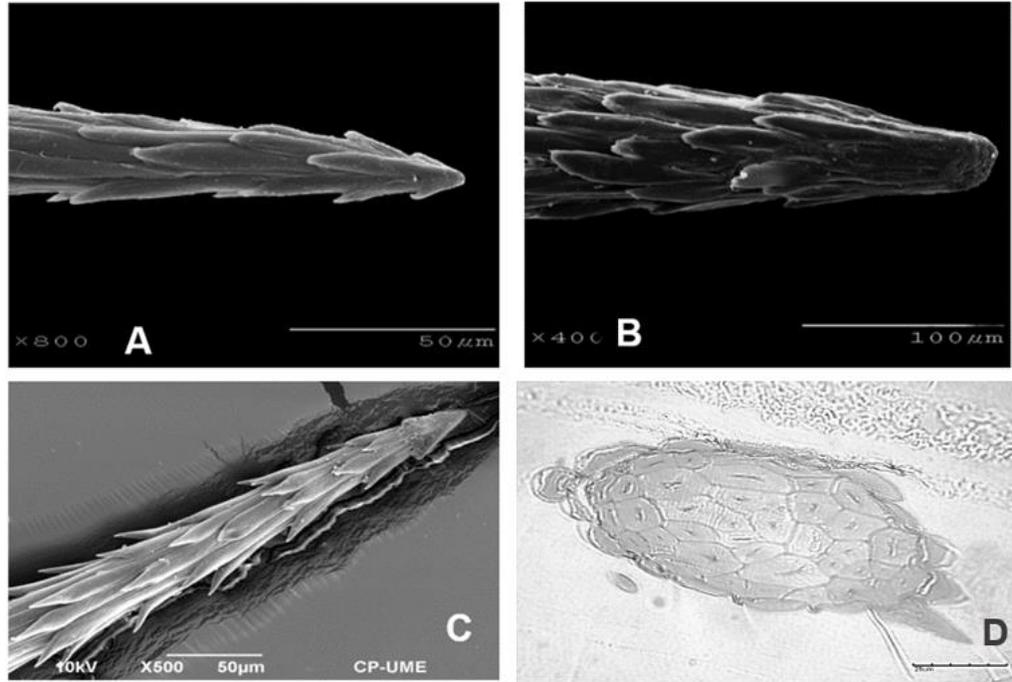


Figura 12. Estructura externa de glóquidas. A. Glóquida, parte apical (Scheinvar, Olalde-Parra, & Gallegos-Vázquez, 2015), B. Ápice de una espina (Scheinvar et al., 2015), C. Glóquida (presente estudio), D. Corte transversal de la Glóquida (presente estudio).

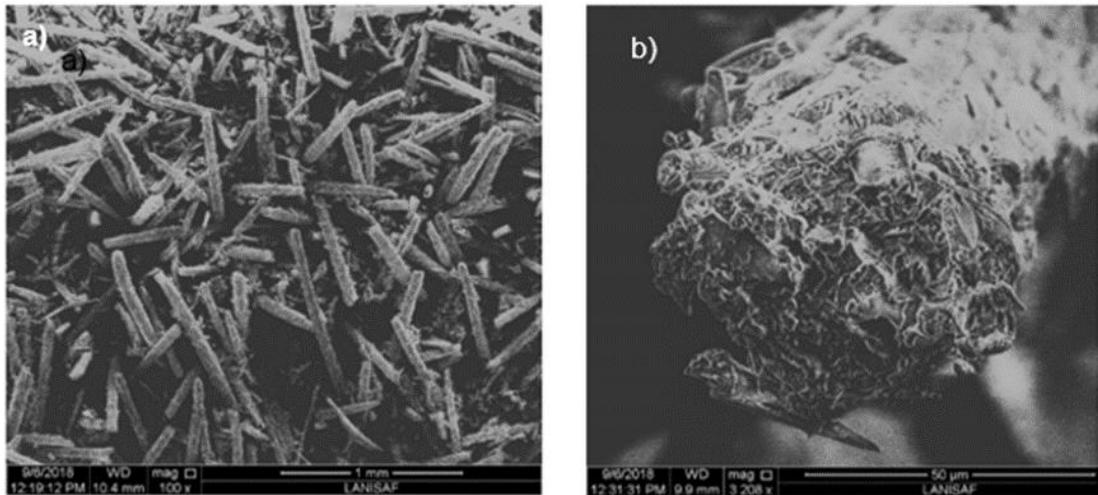


Figura 13. Estructura de externa de *Opuntia ficus-indica* con MEB a) Glóquidas molidas 100x. b) Glóquida trozada 3208x.

Celulosa, hemicelulosa y lignina de la pared celular de las espinas

La composición de la pared celular determinada por el método Van Soest para las glóquidas del presente estudio es comparable a lo reportado en otras investigaciones donde estudiaron la estructura de la espina del cladodio del nopal.

En cuanto a la composición de las glóquidas, estas presentan menor contenido de lignina (Cuadro 15), en comparación con las espinas de los cladodios del nopal, cuyo contenido de lignina es 25% (Gindl-Altmutter & Jozef, 2012). En el siguiente cuadro se tienen las características que los autores reportaron sobre la espina del cladodio nopal y lo obtenido en las glóquidas del presente estudio:

Cuadro 15. Calidad de las glóquidas de tuna *Opuntia ficus-indica*.

Característica	Espina del cladodio	Glóquidas de la tuna ^x
Composición		
Celulosa (%)	47.9 [†]	41.15 (±0.2)
Hemicelulosa (%)	48.4 [†]	41.20 (±0.2)
Lignina (%)	25 ^{††}	5.27(±0.2)
Dimensiones		
Largo (cm)	3.75 [†]	1.667 ± 0.292
Diámetro (µm)	200 ^{††}	67.3± 9.56
Propiedades físico-mecánicas		
Módulo de tensión (GPa)	6.09 ^{††}	-
Resistencia a la rotura (GPa)	0.084 ^{††}	-
Alargamiento a la rotura (%)	25.00 ^{††}	-
Módulo de elasticidad(GPa)	28.00 [¶]	-
Resistencia a la flexión (GPa)	609 [¶]	-
Valor de rigidez(GPa)	2.13 ^{¶¶}	-

Fuente: [†] (Malainine et al., 2003), ^{††}(Gindl-Altmutter & Jozef, 2012), [¶] (Vignon et al., 2004), W (Martinez et al., 2017), x Presente estudio.

Rendimiento de la Hidrólisis

En rendimiento de los procesos de hidrólisis, cuantificado como porcentaje de degradación de la espina, así como contenido de azúcares reductores totales, Grados Brix (°Bx), pH y Conductividad Eléctrica (CE) de las soluciones resultantes de dicha hidrólisis, se presenta en el Cuadro 16. A continuación, se discutirán los tres mejores tratamientos.

El mayor porcentaje de degradación de las espinas y contenido de azúcares reductores se consiguieron con el tratamiento a base de ácido sulfúrico. Asimismo, se observó que los valores de ambos indicadores fueron mayores con el pretratamiento de baño maría antes de su determinación. Esto da indicio de como las espinas pueden ser tratadas para acelerar su degradación y/o aprovechar potencialmente algunos de sus componentes.

El segundo mayor porcentaje de degradación de las glóquidas, así como el mayor valor de °Bx se obtuvieron con el tratamiento a base de ácido fosfórico. Es importante destacar que el pretratamiento de baño María ayudó a la degradación, pero no el valor de °Bx.

Finalmente, la hidrólisis con el hidróxido de potasio fue el tercer mejor tratamiento en cuanto a porcentaje de degradación, °Bx y el contenido de azúcares reductores. Este último indicador fue muy similar al determinado en el tratamiento de hidróxido de sodio, pero con este último los valores de °Bx y degradación fueron inferiores a los obtenidos con los tres mejores tratamientos antes indicados por otra parte, se descartó el hidróxido de sodio porque este representa un contaminante en la naturaleza.

Estos resultados en cierta forma coinciden con Mussatto *et al.* (2006), quienes para bagazo de malta, reportaron que la hidrólisis ácida presenta mayor ataque al material en comparación con la hidrólisis alcalina.

Los valores de Grados Brix obtenidos con los tratamientos de ácido fosfórico (17.50°Bx) e hidróxido de sodio (13.25 °Bx) son bastante altos, al igual que en el tratamiento con hidróxido de calcio (18.43 °Bx), valores que bien pueden estar enmascarados por presencia de sales, ya que por definición los °Bx miden sólidos solubles totales, por lo que es más confiable la cuantificación de azúcares reductores totales, dada su especificidad. La Norma General del CODEX para zumos (jugos) y néctares de frutas (CODEX STAN 247, 2005) indica que las frutas sandía, mango y uva deben tener por lo menos 8, 13.5 y 16 °Bx, respectivamente, por mencionar algunos ejemplos.

En cuanto a la CE de los extractos obtenidos, no presentan problemas de sales en lo general, sin embargo, los valores más altos de CE variaron de 1.24 dS a 1.4 dS para la hidrólisis con ácido fosfórico, hidróxido de potasio, hidróxido de sodio. El pH determinado es de esperarse que no varíe, y más bien es un indicador de que la neutralización se llevó a cabo de forma eficiente.

Cuadro 16. Rendimiento del proceso de hidrólisis.

Reactivo	Porcentaje degradado %	Azúcares Reductores mg g ⁻¹	Grados Brix °Bx	Conductividad Eléctrica dS	pH
Ácido Sulfúrico †	67.9 (±3.9)	41.5 (±2.2)	8.7 (±0.18)	0.88 (±0.03)	7.0 (±0.01)
Ácido Sulfúrico ††	49.8 (±0.7)	21.6 (±2.6)	8.65 (±0.06)	0.86 (±0.01)	7.0 (±0.03)
Ácido fosfórico †	27.4 (±0.8)	7.2 (±0.7)	17.10 (±0.08)	1.24 (±0.02)	7.0 (±0.01)
Ácido fosfórico ††	21.9 (±0.8)	7.2 (±0.7)	17.50 (±0.08)	1.27 (±0.01)	7.0 (±0.01)
Hidróxido de Sodio †	46.8 (±1.8)	11.7 (±0.7)	13.25 (±0.39)	1.51 (±0.02)	7.1 (±0.14)
Hidróxido de Sodio ††	35.4 (±0.8)	9.9 (±0.4)	12.95 (±0.10)	1.48 (±0.02)	7.1 (±0.03)
Peróxido de Hidrógeno ¶	14.7 (±0.2)	1.4 (±0.7)	0.30 (±0.05)	0.01 (±0.00)	7.1 (±0.01)
Hidróxido de calcio ¶¶	11.3 (±0.9)	6.4 (±0.7)	0.43 (±0.05)	0.03 (±0.01)	6.7 (±0.07)
Hidróxido de calcio x	6.1 (±0.8)	8.8 (±0.6)	0.45 (±0.06)	0.04 (±0.01)	7.0 (±0.08)
PHP xx	1.8 (±0.9)	5.5 (±0.4)	10.88 (±2.52)	0.53 (±0.02)	7.0 (±0.01)
PHP f	8.1 (±0.3)	5.2 (±0.5)	9.48 (±0.43)	0.67 (±0.01)	7.0 (±0.03)
Hidróxido de Potasio †	7.4 (±0.9)	18.9 (±1.4)	9.93 (±0.05)	1.40 (±0.00)	7.0 (±0.02)
Hidróxido de Potasio ††	17.6 (±1.5)	19.8 (±0.8)	9.15 (±0.22)	1.29 (±0.03)	7.0 (±0.05)
Hidróxido de calcio ff	2.9 (±0.9)	ND	18.43 (±1.28)	1.3 (±0.02)	7.0 (±0.06)

La desviación estándar se deriva de 3 repeticiones en cada tratamiento. †: 15% de concentración, 24 horas pre-digestión, 60°C por 1 hora, 3 horas a 180 rpm, 1:30. ††: 15% de concentración, 24 horas pre-digestión, 3 horas a 180 rpm, 1:30. ¶: 10% de concentración, 6 horas a 180 rpm, 1:20. ¶¶: 2% de concentración, 60°C por 1 hora, 6 horas a 180 rpm, 2:50. X: 2% de concentración, 6 horas a 180 rpm, 2:50. XX: 79% H3PO4 + 2% H2O2, 24 horas pre-digestión, 40°C por 1 hora, 3 horas a 180 rpm, 1:10. f: 79% H3PO4 + 2% H2O2, 24 horas pre-digestión, 3 horas a 180 rpm, 1:10. ff: 10%, 60°C por 1 hora, 2:50.

Los resultados obtenidos sugieren que para acelerar el proceso de degradación de las espinas se puede recurrir a la hidrólisis ácida o incorporarlas al suelo junto con materiales de reacción ácida, como los estiércoles y fertilizantes nitrogenados.

Contenido nutrimental de las glóquidas de tuna y de los extractos

A continuación, se indica la presencia de nutrimentos propios de las glóquidas y de los tres tratamientos de hidrólisis con mayor porcentaje de degradación, mayor contenido de azúcares reductores y °Bx, independientemente de su pretratamiento (Cuadro 17).

Con la hidrólisis mediante Ácido Sulfúrico, los elementos que se encontraron en mayor concentración fueron: azufre, potasio, calcio. En la solución de la hidrólisis con Ácido Fosfórico, el fósforo es el elemento más abundante, seguido del azufre y el hierro. Finalmente, con el Hidróxido de Potasio se obtuvo mayor concentración de potasio, seguido de hierro y calcio. El mayor contenido de macro nutrimentos se relacionó con el elemento que forma parte de los ácidos y el hidróxido, en este caso sólo para P y K. Si descartamos este enriquecimiento elemental debido al elemento acompañante en la

hidrolisis, se observa que el Ácido Sulfúrico solubiliza una mayor cantidad de macronutrientes de las espinas.

Si se compara los resultados obtenidos con soluciones comerciales nutritivas, la concentración de los macro y micronutrientes de las glóquidas es mayor que en las soluciones de Hoagland-Arnon, Steiner y Wynd. Por lo que este proceso para tratar a las espinas tiene un gran potencial para el sector agronómico.

Cuadro 17. Contenido nutrimental de las glóquidas de tuna y de los extractos producto de la hidrólisis

Solución	N	S	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	B
	Ppm										
Glóquidas †	4550 (±0.0)	140.0 (±0.0)	200.0 (±0.0)	3610.0 (±0.4)	4970.0 (±0.5)	1120.0 (±0.0)	2171.0 (±38.0)	12.2 (±0.9)	27.1 (±2.3)	121.6 (±12.3)	50.0 (±3.8)
	Contenido nutrimental de las espinas hidrolizadas ††										
Ácido Sulfúrico	28.0 (±0.0)	1833.3 (±77.3)	53.3 (±4.8)	2087.94 (±86.3)	1355.4 (±19.8)	311.9 (±0.4)	112.8 (±7.6)	10.7 (±0.1)	17.5 (±2.5)	42.1 (±4.3)	0.8 (±0.1)
Ácido Fosfórico	28.0 (±1.8)	1750 (±41.67)	57467.5 (±645.5)	753.815 (±4.7)	198.7 (±9.7)	243.4 (±8.8)	441.8 (±13.0)	9.6 (±0.4)	23.9 (±2.7)	46 (±2.7)	9.3 (±0.2)
Hidróxido de Potasio	23.3 (±2.0)	1.47 (±0.0)	22.5 (±2.4)	750.795 (±11.4)	422.2 (±18.5)	283 (±4.6)	490.7 (±26.5)	14.9 (±0.6)	17.1 (±1.4)	42.2 (±2.9)	0.8 (±0.1)
	Soluciones nutritivas comerciales ¶										
Hoagland-Arnon	210	64	31	235	160	46	5				
Steiner	167	67	31	277	183	49	3	0.02	0.11	1.97	0.44
Wynd	225	24-6	137	112	167	25					

La desviación estándar se deriva de 3 repeticiones para cada determinación. † presente estudio, resultado de la digestión ácida de glóquidas; †† Presente estudio, en la disolución resultante de la hidrólisis; ¶ (Hewitt, 1966).

En el Cuadro 18 se observa el contenido nutrimental de algunos elementos reportados por diferentes autores donde se destaca que el potasio y el calcio son los elementos más abundantes en las diferentes partes de la tuna. Para el caso de la pulpa, El-Mostafa et al. (2014) indica que la pulpa contiene 1610 ppm de potasio y en el estudio realizado por Díaz-Medina, *et al.* (2007) reporta un valor de 1583 ppm. Si se compara con el contenido nutrimental de las glóquidas del presente estudio, se encontró un valor de 3610 ppm.

Cuadro 18. Contenido nutrimental de diferentes partes de la tuna.

Parte del nopal	Ca	K	P	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn
	ppm							
Pulpa †	590.0	2200.0	240.0	984.0	3.0	1.2	0.8	
Pulpa ††	276.0	1610.0		277.0	15.0			
Pulpa ¶	263.0	1583.0		251.0	1.98.0	2.05	0.39	3.03
Semillas ††	162.0	1630.0	1520.0	748.0	94.5	14.5	3.2	
Cladodio ††	56.4-179.5	23.5-552.0	1.5-25.9	88.0	0.9	0.8		1.9-2.9

Fuente: † (Ochoa-Velasco & Guerrero-Beltrán, 2010), ††(El-Mostafa *et al.*, 2014), ¶ (Díaz-Medina, *et al.*, 2007).

El conocimiento del contenido de los elementos esenciales para las plantas en esta fase de laboratorio, proporciona las bases para poder usarlas como insumo en la nutrición de cultivos. De esta forma se reduce el impacto ambiental que genera este material en campo, contribuyendo así con el conocimiento científico e innovando en la economía circular en el sector agrícola.

Limitaciones del estudio e implicaciones

Con el presente estudio se logró determinar el contenido de elementos esenciales de las glóquidas antes y después de ser hidrolizadas. Sin embargo, es necesario realizar pruebas en las cuales la solución obtenida por hidrólisis se aplique a cultivos para determinar su potencial como fertilizante.

CONCLUSIONES

Las glóquidas de la tuna poseen barbas retrorsas, cuya longitud es de $1667 \pm 292 \mu\text{m}$ y diámetro de $67.3 \pm 9.56 \mu\text{m}$, comparables a las glóquidas de otras especies de opuntias.

El 83.35 % de la pared celular está compuesta por celulosa y hemicelulosa en proporciones similares. Sólo el 5.3% es lignina.

Los mayores porcentajes de degradación y obtención de azúcares reductores totales se obtuvieron a partir de la hidrólisis con Ácido Sulfúrico, Ácido Fosfórico e Hidróxido de Potasio.

La hidrólisis con Ácido Sulfúrico solubilizó la mayor cantidad de minerales de las glóquidas. Con este procedimiento: K, Ca y Mg son los más abundantes; P, N y S son los de menor concentración; y entre los micronutrientes resalta el Fe por su mayor contenido.

La presente investigación evidencia la posibilidad de utilizar estos extractos de las glóquidas para usos agronómicos en la nutrición de cultivos. Se recomienda realizar pruebas en campo para ver la respuesta en diferentes cultivos.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcántar, G., & Sandoval, V. (1999). Manual de análisis químico de tejido vegetal: guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. *Sociedad Mexicana de La Ciencia Del Suelo*, 10:55.
- Callejas-Juárez, N., Matus-Gardea, J., García-Salazar, J. A., Martínez-Damián, M. A., & Salas-González, J. M. (2009). Situación actual y perspectivas de mercado para la tuna, el nopalito y derivados en el estado de México, 2006. *Agrociencia*, 43(1), 73–82.
- Chahdoura, H., Morales, P., Barreira, J., Barros, L., Fernández, V., Ferreira, I., & Achour, L. (2015). Dietary fiber, mineral elements profile and macronutrients composition in different edible parts of *Opuntia microdasys* (Lehm.) Pfeiff and *Opuntia macrorhiza* (Engelm.). *Food Science and Technology*, 64: 446–451. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.011>
- CODEX STAN 247. (2005). *Norma general del CODEX para zumos (jugos) y néctares de frutas. CODEX STAN 247.*
- Crofts, S. B., & Anderson, P. S. L. (2018). The influence of cactus spine surface structure on puncture performance and anchoring ability is tuned for ecology. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.2280>
- Díaz-Medina, E., Rodríguez-Rodríguez, E., & Díaz-Romero, C. (2007). Chemical characterization of *Opuntia dillenii* and *Opuntia ficus indica* fruits. *Food Chemistry*, 103: 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.06.064>
- Dieter, R. A., Whitehouse, L. R., & Gulliver, R. (2017). Cactus Spine Wounds: A Case Report and Short Review of the Literature. *Wounds : A Compendium of Clinical*

Research and Practice, 29:1–8.

Doctoroff, A., Vidimos, A., & Taylor, J. (2000). Cactus Skin Injuries. *Cutis*, 65:3–5.

Domínguez-Domínguez, M. M., Álvarez-Castillo, A., Granados-Baeza, M., & Hernández-Campos, F. (2012). Estudio de la cinética del pretatramiento e hidrólisis ácida del bagazo de caña de azúcar. *Iberoamericana de Polimeros*, 13:200–211.

El-Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbaj, M. S., Cherkaoui-Malki, M. (2014). Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules*, 19:14879–14901. <https://doi.org/10.3390/molecules190914879>

Ford, A. M., Haywood, S. T., & Gallo, D. R. (2019). Novel Method for Removing Embedded Cactus Spines in the Emergency Department. *Case Reports in Emergency Medicine*, 2019:1–2. <https://doi.org/10.1155/2019/6062531>

Gindl-Altmutter, W., & Jozef, K. (2012). The structure and mechanical properties of spines from the cactus. *Bioresources*, 7:1232–1237.

Gómez Trovar, F. (2008). *Métodos secuenciales de pretratamiento químico y enzimático de residuos agrícolas para la producción de metano*. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.

Hewitt, E. . (1966). Sand and Water Culture Methods used in the. *Farnham Royal (Bucks), Commonwealth Agricultural Bureaux*, 22:479–534.

Kalegowda, P., Jagannath, D., Rajarathnam, S., & Nanjarajurs, M. (2015). Minerals of cactus (*Opuntia dillenii*): cladode and fruit. *Current Science*, 109:1–4. <https://doi.org/10.18520/v109/i12/2288-2295>

Malainine, M. E., Dufresne, A., Dupeyre, D., Mahrouz, M., Vuong, R., & Vignon, M. R. (2003). Structure and morphology of cladodes and spines of *Opuntia ficus-indica*. Cellulose extraction and characterisation. *Carbohydrate Polymers*, 51:77–83. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(02\)00157-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00157-1)

Martinez, J., Stewart, T., & Szeto, P. (2017). *The Relationship between Structural*

Parameters And Mechanical Properties Of Cactus Spines. California Polytechnic State University.

- Mussatto, S. I., Dragone, G., Fernandes, M., Rocha, G. J. M., & Roberto, I. C. (2006). Efecto de los tratamientos de hidrólisis ácida e hidrólisis alcalina en la estructura del bagazo de malta para liberación de fibras de celulosa.
- Mustafa-Odat, T. A., Al-Tawara-Jebreel, M., & Hussein-Hammouri, E. (2014). Prickly pear spine keratoconjunctivitis. *Middle East African Journal of Ophthalmology*, 21:61–65. <https://doi.org/10.4103/0974-9233.124100>
- Ochoa-Velasco, C., & Guerrero-Beltrán, J. (2010). La tuna: una perspectiva de su producción, propiedades y métodos de conservación. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 4:49–63.
- Qiu, J., Ma, L., Shen, F., Yang, G., Zhang, Y., Deng, S., Hu, Y. (2017). Pretreating wheat straw by phosphoric acid plus hydrogen peroxide for enzymatic saccharification and ethanol production at high solid loading. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.040>
- Rabelo, S. C., Filho, R. M., & Costa, A. C. (2008). A Comparison Between Lime and Alkaline Hydrogen Peroxide Pretreatments of Sugarcane Bagasse for Ethanol Production. *Appl Biochem Biotechnol*, 1:87–100. <https://doi.org/10.1007/s12010-007-8086-y>
- Scheinvar, L., Olalde-Parra, G., & Gallegos-Vázquez, C. (2015). A new species of the genus *Opuntia* (Cactaceae) for the state of Veracruz, Mexico. *Botanical Sciences*, 93:33–39. <https://doi.org/10.17129/botsci.133>
- Suhrhoff, T. J., & Scholz-Böttcher, B. M. (2016). Qualitative impact of salinity, UV radiation and turbulence on leaching of organic plastic additives from four common plastics - A lab experiment. *Marine Pollution Bulletin*, 102:84–94. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.11.054>
- Tejeda, L., Quintana, J., Pérez, J., & Young, H. (2011). Obtención de etanol a partir de residuos de poda, mediante hidrólisis ácida e hidrólisis enzimática. *Revista U.D.C.A*

Actualidad & Divulgación Científica, 14:111–116.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.015>

Van Soest, P., Robertson, J., & Lewis, B. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74:3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)

Vignon, M. R., Heux, L., Malainine, M. E., & Mahrouz, M. (2004). Arabinan-cellulose composite in *Opuntia ficus-indica* prickly pear spines. *Carbohydrate Research*, 339:123–131. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2003.09.023>

Yousef, K. A., Goshinska, A. J., Bailowitz, Z. P., & Amini, R. (2017). Cactus thorn detection using bedside ultrasound. *Internal and Emergency Medicine*, 12:545–546. <https://doi.org/10.1007/s11739-016-1515-6>

ARTÍCULO 2: IMPACTO AMBIENTAL DE LAS GLÓQUIDAS DE TUNA Y POTENCIAL DE USO EN LA NUTRICIÓN DE CULTIVOS

ENVIRONMENTAL IMPACT OF TUNA GLOCHIDS AND POTENTIAL USE IN CROP NUTRITION

Alonso Ulloa-Leitón¹, M. Edna Álvarez-Sánchez*¹, Cecilia García-Osorio², Francisco Gavi-Reyes ², Ranferi Maldonado-Torres¹ y Julio César Buendía¹.

1. Universidad Autónoma Chapingo, Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Texcoco, Estado de México, México 2. y 3. Colegio de Postgraduados, Departamento de Fruticultura y Departamento de Edafología e Hidrociencias, Texcoco, Estado de México, México.

*Autor para correspondencia (edna_alvarez30@yahoo.com.mx)

RESUMEN

La producción de tuna en México aumentó de 43,000 t a 408,000 t en los últimos 35 años lo que ha provocado un incremento en la producción de glóquidas (“ahuates”) después de su beneficio. Sin embargo, este material tiene alta resistencia a la degradación biológica y a la quema, es recolectado en bolsas plásticas y desechadas en los campos, sin ningún tipo de tratamiento o una disposición correcta de este, lo que provoca un impacto negativo sobre el ambiente. Es por ello, que se determinó la producción de glóquidas de tuna, y la viabilidad de utilizar este material como insumo en la fertilización foliar en tuna y en rosales bajo invernadero, para reducir y/o mitigar el impacto sobre el ambiente.

El impacto ambiental de las glóquidas se determinó a partir del rendimiento productivo de tuna y se generó un modelo de regresión lineal ($Y = 0.5628 X$, con un $R^2 = 0.96$), para determinar la producción de glóquidas en el municipio de Nopaltepec, Estado de México. Se estimó la producción de glóquidas para el periodo 2010 al 2015 a partir del rendimiento reportado y el resultado obtenido fue de 80.06 t en total. Además, se determinó que la producción de glóquidas equivale entre 11.26 kg y 12.38 kg por hectárea para dos unidades productivas de la zona.

En cuanto a la evaluación como insumo nutrimental, se obtuvo diferencia significativa con el fertilizante 1 y 2 respecto a los demás, esto en cuanto a la longitud de pedúnculo en rosas. Además, se obtuvo un valor superior en la vida floral del producto de 14 días. Por lo que se infiere que el uso de las glóquidas como insumo en la nutrición de cultivos tiene potencial agronómico.

Palabras claves: Glóquidas, *Opuntia Ficus-Indica*, impacto ambiental, fertilización foliar, cultivo de rosas.

SUMMARY

Prickly pear production in Mexico has increased from 43,000 t to 408,000 t in the last 35 years, which has led to an increase in the production of glochids (“ahuates”) after their benefit. However, this material has high resistance to biological degradation and burning, is collected in plastic bags and discarded in the fields, without any treatment or proper disposal of it, which causes a negative impact on the environment. For that reason the production of prickly pear glochids was determined, and the viability of using this material as an input in foliar fertilization in prickly pear and in rosebushes under greenhouse, to reduce and / or mitigate the impact on the environment.

Based on the linear regression model obtained from the yield, the production of glochids was estimated for the municipality of Nopaltepec, State of Mexico, from 2010 to 2015, the result obtained was 80.06 t in total. In addition, it was determined that the production of glochids equals between 11.26 kg and 12.38 kg per hectare for two productive units in the area.

Regarding the evaluation as a nutritional input, a significant difference was obtained with fertilizer 1 and 2 with respect to the others, this in term of peduncle length in roses. In addition, a superior value in the floral life of the product of 14 days was obtained. Therefore, it can be inferred that the use of glochids as an input in crop nutrition has agronomic potential.

Index words: Glochids, *Opuntia Ficus-Indica*, environmental impact, foliar fertilization, roses.

INTRODUCCIÓN

La producción de tuna en México en los últimos 30 años, ha adquirido gran importancia a nivel económico debido a su incremento en más de un 900% desde 1980 hasta el 2015 (Domínguez-García, *et al.*, 2017). Esto, representa una fuente ingresos económicos importante para los productores de estas zonas ya que obtienen una ganancia de \$ 3.92 por cada peso invertido (Callejas-Juárez, *et al.*, 2009).

Si bien la producción de tuna genera beneficios económicos a los productores, también provoca una serie de problemas derivados de un manejo inadecuado de los desechos orgánicos e inorgánicos del sistema de producción

Durante la temporada de cosecha el fruto de la tuna es limpiado mediante máquinas desespadoras, los residuos que salen de este proceso son las glóquidas conocidas popularmente como “ahuates” y son recolectadas en bolsas plásticas y finalmente desechado en los campos, sin ningún tipo de tratamiento o alguna disposición correcta de este. De acuerdo con Suhrhoff y Scholz-Böttcher (2016), indica que el plástico liberado al ambiente es una problemática a nivel mundial; por lo que aunado a esta realidad, el problema de la disposición de las glóquidas (las cuales poseen alta resistencia a la degradación biológica y a la quema), provocan que se acumulen con el tiempo en el campo lo cual genera un impacto negativo sobre el medio ambiente en la localidad.

Las glóquidas además del impacto sobre el medio ambiente, representan un riesgo para la salud de las personas, ya que pueden incrustarse en la piel, causando diferentes grados de irritación (Doctoroff, *et al.*, 2000). También se ha reportado afectaciones en los ojos con serias consecuencias para la vista (Mustafa-Odat, *et al.*, 2014).

La evidencia del efecto negativo de las glóquidas en la salud de las personas, la escases de reportes sobre la cantidad producida de estos residuos por unidad de superficie, y la falta de información sobre posibles usos como insumos en la nutrición vegetal, son la motivación del presente estudio, el cual tiene como objetivo estimar la producción de glóquidas del sistema de producción tunero, y la viabilidad de utilizar este material como

insumo en la fertilización foliar para reducir y/o mitigar el impacto sobre el medio ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolección del material

El área donde se recolectó el material para la presente investigación, fue en la zona tunera de Nopaltepec específicamente en San Felipe Teotitlán que se encuentra a 19°47'51.05'' latitud N y 98°40'47.95''O, con el apoyo de los productores de la localidad.

Rendimiento de la producción de glóquidas

Para la estimación del rendimiento de producción de las glóquidas fue necesario cuantificar la producción de tuna procesada (fruto limpio). El periodo de recolección de la información fue durante la temporada de cosecha a partir del día 11/08/2018 hasta el 26/10/2018.

Se realizó la cuantificación de la producción de tuna por jornal mediante el pesaje de las cajas utilizando una báscula de la marca "Ohaus" serie de escala compacta, en la cual se pesaron 20 cajas por cada visita realizada al lugar de trabajo, donde se promediaron los datos del peso de las cajas de tunas y se multiplicó por el total de cajas producidas. Posteriormente, se pesaron las glóquidas recolectadas de la máquina desespinaadora producidas durante la visita, .

A partir de esta información obtenida se generó un modelo de regresión lineal que permitió cuantificar la cantidad de glóquidas producidas a partir del rendimiento productivo de tuna.

Impacto ambiental en el municipio de Nopaltepec

El impacto ambiental de las glóquidas se estimó para el periodo del 2010 al 2015 donde se tiene el reporte de los rendimientos productivos de cada año en ese periodo. La información obtenida fue a partir de los datos del IICA (2017) donde indican los rendimientos para cada año de ese periodo para el Estado de México. Los resultados obtenidos fue proyectada para el área productiva en el municipio de Nopaltepec, reportado

por Ramírez Abarca *et al.* (2015) donde indica que la superficie de plantación de tuna es de 2532 ha.

Se obtuvo un total de la cantidad estimada de glóquidas y con la densidad aparente de este material se calculó los metros cúbicos totales. La densidad aparente es de 0.1574 (m/v).

Uso potencia como fertilizante foliar

La preparación de los fertilizantes foliares se realizó a partir de la hidrólisis de las glóquidas con Ácido Sulfúrico, Ácido Fosfórico, e Hidróxido de Potasio al 15% cada tratamiento en una proporción de sólido líquido de 1:30, esto a partir de los resultados previos reportados en el primer artículo de la presente investigación.

Las fracciones líquidas resultantes de los tres tipos de hidrólisis, indicadas previamente, fueron preparadas al 100% y 50% con agua de pozo para usarse como fertilizante foliar, y constituyeron seis soluciones nutritivas a comparar con la fertilización convencional. Estos siete tratamientos fueron aplicados a un cultivo de rosas de la variedad “*Polar Star*” en condiciones de invernadero. Por otra parte, la fertilización convencional consiste en la aplicación al suelo cada 45 días de 250 kg de DAP (18-46-0); 150 kg de Fosfonitrato (33-3-0); 100 kg de Sulfato de Magnesio(16mg-13s) y 50kg de Nitrato de Potasio (12-0-46) por hectárea.

A cada fracción líquida de los tres tipos de hidrolisis se le determinó macro y micro nutrientes (N, P, k, Ca, Mg, S, Si, Fe, Mn, Cu, Zn, B). Para ello se usó un equipo de absorción química (K, Ca, Mg, Si, Fe, Mn, Cu, Zn) y técnicas convencionales de análisis químico (N, P, B y S) de acuerdo con el método de micro-Kjeldahl (Alcántar & Sandoval, 1999). En el

Cuadro 19 se tienen las soluciones nutritivas:

Cuadro 19. Soluciones nutritivas a partir de las glóquidas del fruto de tuna.

Tratamiento	N	S	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	B
	ppm										
Ácido sulfúrico	28.0 (±0.0)	1833.3 (±77.3)	53.3 (±4.8)	2087.94 (±86.3)	1355.4 (±19.8)	311.9 (±0.4)	112.8 (±7.6)	10.7 (±0.1)	17.5 (±2.5)	42.1 (±4.3)	0.8 (±0.1)
Ácido Fosfórico	28.0 (±1.8)	1750 (±41.67)	57467.5 (±645.5)	753.815 (±4.7)	198.7 (±9.7)	243.4 (±8.8)	441.8 (±13.0)	9.6 (±0.4)	23.9 (±2.7)	46 (±2.7)	9.3 (±0.2)
Hidróxido de Potasio	23.3 (±2.0)	1.47 (±0.0)	22.5 (±2.4)	750.795 (±11.4)	422.2 (±18.5)	283 (±4.6)	490.7 (±26.5)	14.9 (±0.6)	17.1 (±1.4)	42.2 (±2.9)	0.8 (±0.1)

Evaluación del insumo de nutrición vegetal en rosas bajo invernadero

El diseño experimental establecido fue un Diseño Completamente al Azar con diferente número de repeticiones (DCA). Se realizaron 3 aplicaciones diferentes cada 15 días con una bomba manual de aspersion foliar. Posteriormente se cosechó el material de estudio después de la tercera aplicación de la fertilización foliar. En cuanto a la aplicación de los fertilizantes foliares, se les aplicó la fertilización convencional junto con la fertilización de prueba.

Las variables que se midieron para determinar el efecto de los tratamientos sobre las plantas fueron el diámetro y longitud de tallo de corte, diámetro del pedúnculo y su longitud y además la vida de la rosa en florero. Estas variables son básicas para determinar la calidad del producto cosechado y su vida de uso.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos de las variables medidas fueron analizados con las pruebas de normalidad, Homocedasticidad y Coeficiente de Variación, se utilizó el programa estadístico “R” en el cual se realizó la prueba de Shapiro-Wilks, Bartlett y el Porcentaje del Coeficiente de Variación (CV %). Posteriormente se aplicó la prueba de Kruskal Wallis, para determinar si en los tratamientos hubo o no diferencias significativas.

Finalmente se utilizó el programa de estadística “Infostat 2019” para la prueba de Tukey y determinar entre cuales tratamiento hubo alguna diferencia significativa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Impacto ambiental de las glóquidas de tuna

Rendimiento de la producción de glóquidas

La cantidad de glóquidas que se generan producto de la limpieza del fruto de tuna se encontró que depende directamente del rendimiento del cultivo, es decir que entre mayor sea la producción, mayor será la cantidad de glóquidas que se generan. A continuación, se obtuvo el siguiente modelo de regresión lineal (Figura 14) que permite la producción de las glóquidas:

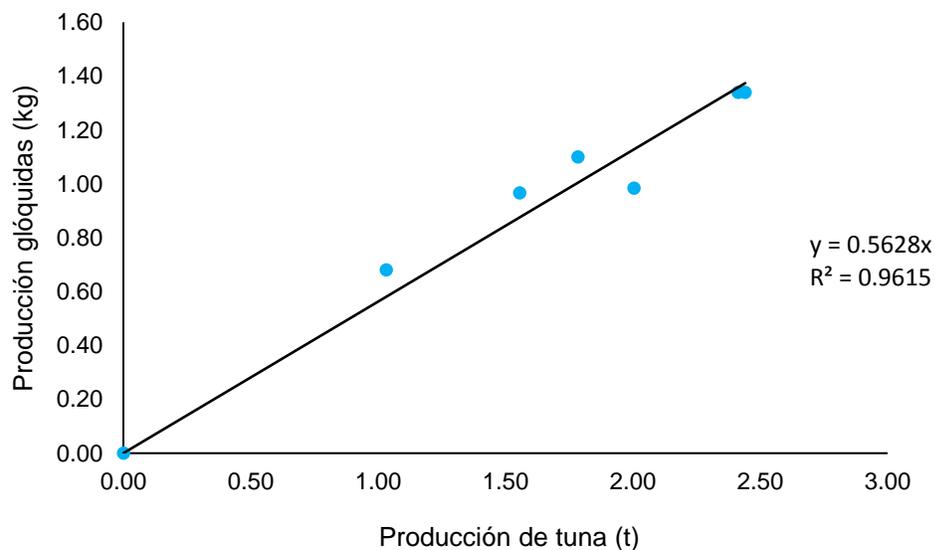


Figura 14. Modelo de regresión lineal para la estimación de glóquidas.

Con este modelo se estimó la cantidad de glóquidas generadas en el municipio de Nopaltepec, Estado de México (Cuadro 20); a partir del área productiva el cual corresponde a 2532 ha (Ramírez Abarca et al., 2015) con los rendimientos reportados por el IICA (2017). se determinó que la cantidad de glóquidas producidas en el periodo 2010 al 2015, corresponde a 80.06 t o lo que es equivalente a 508.64 m³. Para el año 2014 se observa que hubo mayor rendimiento en la producción de tuna y consecuentemente mayor cantidad de glóquidas que en los otros años (Cuadro 20).

Es importante destacar que entre mayor sea el rendimiento del cultivo, mayor producción de glóquidas habrá, por lo que se deben tomar medidas para poder disponer adecuadamente este material y reducir su impacto ambiental.

Cuadro 20. Estimación de la producción de glóquidas para el municipio de Nopaltepec, Estado de México.

Año	Rendimiento[†] (t ha⁻¹)	Producción total de tuna (t)	Producción glóquidas (t)
2010	8.4	21319.4	12.0
2011	7.2	18306.4	10.3
2012	10.3	26130.2	14.7
2013	9.6	24281.9	13.7
2014	11.0	27902.6	15.7
2015	9.6	24307.2	13.7
		Total	80.1

Fuente: † (IICA, 2017).

En un estudio realizado por Domínguez-garcía, et al. (2017) en San Felipe Teotitlán, Nopaltepec, encontró que el rendimiento promedio para 2 unidades diferentes de producción con 4 ha y 25 ha cada una fue de 20 y 22 t ha⁻¹, por lo que la cantidad de glóquidas generadas para estas unidades de producción equivalen a 11.26 kg y 12.38 kg respectivamente por hectárea. Si se hace específicamente al área total para cada unidad productiva equivaldría a un total de 45.02 kg y 309.54 kg. Estos resultados evidencian la importancia en cuanto a la producción de glóquidas, subproducto que sale del sistema de producción generándose una extracción acumulativa importante y que precisa darle valor agregado para la sostenibilidad del propio sistema y de cuidado del medio ambiente.

Potencial de los extractos de glóquidas como fertilizante foliar en el cultivo de rosa

El uso de las glóquidas como insumo en la nutrición foliar fue evaluada a partir de los tratamientos de la hidrólisis que logró extraer la mayor cantidad de Azúcares Reductores Totales. En un estudio realizado por Carrillo-Mendoza, et al. (2005) aplicó foliarmente sacarosa a un cultivo de fresas para determinar el comportamiento de la planta, se encontró que hubo un incremento en el vigor y producción del follaje en un 8% comparado al

testigo, por lo que da indicios de que la planta responde positivamente cuando se le aplica este compuesto foliarmente. La respuesta que se obtuvo para cada una de las variables evaluadas, se muestran en el Cuadro 21:

Cuadro 21. Medias obtenidas de cada variable evaluada en cultivo de rosas.

Tratamiento	Base	Dosis	Diámetro Basal de Tallo	Diámetro de Pedúnculo	Longitud de Tallo	Longitud de Pedúnculo	Vida Floral
		%	mm	mm	cm	cm	días
Fertilizante 1	Ácido	50	5.5 (±0.7)	4.2 (±0.6)	34.7 (±6.6)	8.7 (±0.9)	14.0 (±1.2)
Fertilizante 2	Sulfúrico	100	5.3 (±0.6)	4.3 (±0.4)	32.8 (±7.2)	8.8 (±1.2)	12.8 (±1.1)
Fertilizante 3	Ácido	50	5.22 (±0.7)	4.1 (±0.5)	32.7 (±7.2)	7.6(±0.8)	12.6 (±1.4)
Fertilizante 4	Fosfórico	100	5.7 (±0.6)	4.3 (±0.5)	35.4 (±6.4)	7.3 (±0.7)	12.7 (±1.5)
Fertilizante 5	Hidróxido de	50	5.4 (±0.6)	4.2 (±0.3)	34.6 (±5.4)	7.8 (±0.8)	12.4 (±1.3)
Fertilizante 6	Potasio	100	5.4 (±0.6)	4.0 (±0.5)	35.0 (±6.2)	7.3 (±0.6)	12.0 (±1.5)
Fertilizante 7	Fertilización convencional	0	5.5 (±0.6)	4.1 (±0.5)	36.1 (±6.3)	7.8 (±0.7)	11.9 (±1.6)

Los resultados obtenidos en el experimento se pueden observar gráficamente la respuesta que hubo en la planta con la aplicación de las diferentes soluciones foliares (Figura 15).

Para la variable diámetro basal del tallo, si bien no hubo diferencias significativas entre tratamientos, se observó que con la aplicación del fertilizante 4, promovió un incremento en el diámetro, seguido por el fertilizante 1 con valores de 5.7 y 5.5 mm respectivamente. Lo que es un buen indicador para mantener la hidratación de los tejidos y la vida floral (Arriaga Frías, De la Cruz Guzmán, & Mandujano Piña, 2016). En un estudio realizado en 5 cultivares de rosa se encontró que el grosor de tallo varía de 5.0 a 6.0 mm (Romero Arellano, 2013). De acuerdo con Yong (2004) los fosfatos estimulan el crecimiento de raíces y de los tallos y aceleran la floración; además el diámetro de los tallos se incrementa cuando hay una inhibición de las hormonas auxinas y giberelinas, ya que las células de raíces y tallos se expanden y se incrementa el grosor de los tallos cuando se aplican citocininas exógenas (Díaz, 2007).

Con respecto a la variable del diámetro del pedúnculo no hubo diferencias significativas, sin embargo, en los resultados obtenidos se observa que el tratamiento con el fertilizante 4 se obtuvo 4.3 mm, y si se compara con el fertilizante 7 (fertilización convencional) el

cual fue 4.1 mm, se obtuvo una diferencia de 0.17 mm. Esta diferencia puede representar una ventaja para la calidad del producto final y su vida floral ya que entre mayor sea el diámetro del pedúnculo, podrá soportar el botón floral sin curvarse (Romero Arellano, 2013).

La longitud del tallo depende de la temperatura ambiental ya que un incremento durante el día hace disminuir la longitud en un 39%, para las mismas horas luz (Dorantes, 1984). En cuanto a la calidad de exportación el tallo debe estar libre de plagas y enfermedades, tallos rectos, y con una longitud mayor a 40 cm (Calvache Ulloa, 2010). Los resultados obtenidos indican que no hubo diferencias significativas, pero se observa que el tratamiento con mayor longitud fue el tratamiento con el fertilizante 7 con 36.11 cm seguido por el fertilizante 4 con 35.4 cm. De acuerdo con De Paz Acevedo (2017) que para la variedad de rosa “Polar Star” es una variedad de tallo corto, en la cual los tallos cosechados pueden ser de 40 a 80 cm de longitud. Por lo que para obtener una mejor calidad del producto final es necesario realizar observaciones en cuanto al manejo y mantenimiento técnico de las plantas (control de factores ambientales como la luz). Esta variable junto con el diámetro de tallo es esencial para que el producto final tenga una vida más larga post cosecha (Arriaga Frías et al., 2016).

La variable longitud de pedúnculo hubo una respuesta significativa para los tratamientos con el fertilizante 1 y 2 con valores de 8.73 y 8.77 cm si se compara con el fertilizante 7 (fertilización convencional) que fue 7.83 cm. Esta variable es importante para la calidad de la rosa ya que le da mayor resistencia a la vida pos-cosecha, en cuanto al transporte, y almacenamiento (Romero Arellano, 2013). De acuerdo con Botondi, Espsito, Massantini, & Mentcarelli (1998) encontraron que el alargamiento del pedúnculo en gerbera se debe a la acción de las auxinas en las plantas (las auxinas participan en los procesos de desarrollo de las plantas y, a nivel celular, intervienen en los procesos de división, elongación y diferenciación celular (Garay Arroyo et al., 2014)). Por lo que esto es un factor determinante para esta variable en cuanto a la longitud del pedúnculo.

En cuanto a la vida floral del producto, no hubo diferencias significativas en los tratamientos sin embargo en el tratamiento con el fertilizante 1 se observó que hubo una mejor respuesta con un valor de 14 días con respecto al fertilizante 7 que fue de 11.9 días.

De acuerdo con Arriaga Frías et al. (2016) se reportó valores para la vida floral en rosa “Cv. Polo” con diferentes longitudes de tallo y se determinó que los tallos con una longitud de 25 cm el valor es de 7.3 días y para una longitud de 35 cm se incrementa a 10.6 días, y finalmente se evaluó para tallos mayores a 50 cm el valor es 11.4 días. Una de las características que determinó la vida floral fue la curvatura del pedúnculo, el cual es un indicativo de que la flor ya se marchitó (Puerta, 2017). Estos valores reportados reflejan la importancia de la longitud del tallo con respecto a la vida post-cosecha del producto. Por lo que es necesario tener control de los factores ambientales como la luz, temperatura, suelo, y complementarlo con una adecuada fertilización.

Con los resultados obtenidos en el cultivo de rosas, el uso de las glóquidas como insumo nutricional tiene potencial agronómico.

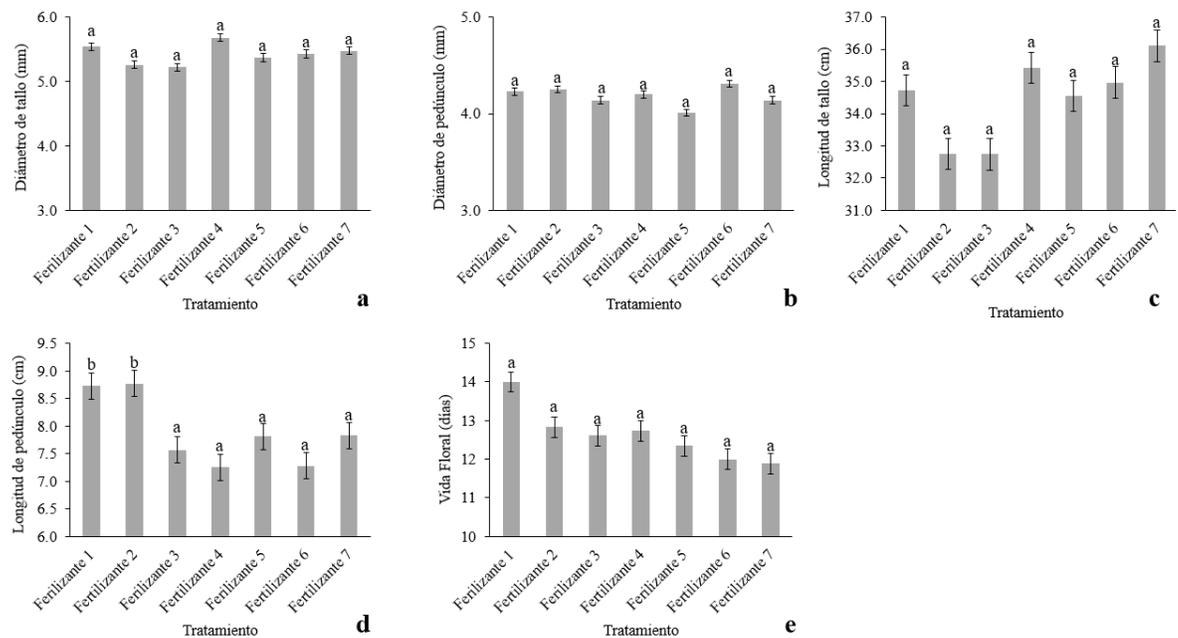


Figura 15. Medias obtenidas de las variables evaluadas en el cultivo de rosas. a) Diámetro basal de tallo, b) Diámetro de pedúnculo, c) Longitud de tallo, d) Longitud de pedúnculo, f) Vida floral.

Análisis estadístico del experimento

El análisis estadístico que se aplicó se muestra en el Cuadro 22, donde se hicieron las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilks, Homocedasticidad con Barlett y el Coeficiente de Variación.

Cuadro 22. Prueba de normalidad, homocedasticidad para las variables del experimento del cultivo de rosas.

Variable	Prueba de Normalidad	Homocedasticidad	Coefficiente de Variación
	p Shapiro-Wilks	p Bartlett	% CV
Diámetro Basal de Tallo	0.14	0.88	11.86
Diámetro de Pedúnculo	0.07	0.29	11.40
Longitud de Tallo	0.30	0.81	18.9
Longitud de Pedúnculo	0.17	0.02	10.6
Vida Floral	0.0005	0.48	23.8

Para un valor de confianza de $p < 0.05$.

Con base al análisis anterior se realizó la prueba de Kruskal-Wallis (Cuadro 23) para determinar si hubo o no diferencias significativas y se encontró que si hubo diferencias para la variable longitud de pedúnculo el cual su valor de p fue inferior a 0.05.

Cuadro 23. Prueba de Kruskal-Wallis en el experimento de cultivo de rosas.

Factor	Diámetro Basal de Tallo	Diámetro de Pedúnculo	Longitud de Tallo	Longitud de Pedúnculo	Vida Floral
C	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98
H	10.71	7.01	5.58	58.77	10.25
Valor de p	0.0976	0.3194	0.4708	<0.0001	0.1069

Donde H es el valor estadístico, C factor de corrección. Para un valor de confianza de $p < 0.05$.
Donde H0: las observaciones tienen distribución normal; versus H1: las observaciones no tienen distribución normal.

En el Cuadro 24 se muestra la comparación de medias de las variables respuesta de acuerdo con la prueba Tukey, se observa que el fertilizante 1 y 2 promovió significativamente el crecimiento de la longitud del pedúnculo; en forma concentrada la longitud fue de 8.77 cm y diluida al 50% con 8.73 cm, con respecto al tratamiento testigo con 7.83 cm.

La longitud y el diámetro de pedúnculo son variables muy importantes para la calidad de rosas, ya que le brinda a la flor resistencia a factores ambientales, según argumenta

Puerta (2017), el curvado del pedúnculo es el factor que más afecta la vida post cosecha. Por lo que es necesario que el desarrollo de la planta sea óptimo.

Cuadro 24. Análisis de varianza en rosas en respuesta a los fertilizantes foliares.

Tratamiento	Diámetro de tallo	Diámetro de Pedúnculo	Longitud de Tallo	Longitud Pedúnculo	Vida Floral
	mm	mm	cm	cm	días
Fertilizante 1	5.54 ns	4.23 ns	34.73 ns	8.73**	13.97 ns
Fertilizante 2	5.26 ns	4.25 ns	32.76 ns	8.77**	12.83 ns
Fertilizante 3	5.22 ns	4.14 ns	32.74 ns	7.57 ns	12.61 ns
Fertilizante 4	5.68 ns	4.31 ns	35.42 ns	7.25 ns	12.74 ns
Fertilizante 5	5.37 ns	4.2 ns	34.56 ns	7.81ns	12.35 ns
Fertilizante 6	5.43 ns	4.01 ns	34.97 ns	7.28 ns	12.00 ns
Fertilizante 7	5.48 ns	4.14 ns	36.11 ns	7.83 ns	11.89 ns
DMS de Tukey	0.37	0.27	3.71	0.47	1.69
CV (%)	11.86	11.44	18.99	10.62	23.79

ns= no significativo ($p > 0.05$); *= significativo ($p > 0.01$ y $p \leq 0.05$); **=altamente significativo ($p \leq 0.01$). Valores con la misma letra son estadísticamente iguales. DMS= Diferencia Mínima Significativa.

CONCLUSIONES

El impacto ambiental por la cosecha del fruto de tuna es importante darle un manejo apropiado para la seguridad de las personas y disminuir la presión sobre la pérdida de nutrientes al suelo.

El análisis nutrimental de los fertilizantes elaborados a partir de las glóquidas, dan indicios de que tienen potencial para usarse como insumo en la nutrición de cultivos.

La aplicación de las glóquidas en rosa bajo condiciones de invernadero, tiene potencial para ser usado como insumo en la nutrición vegetal. El tratamiento con fertilizante 1 y 2 hubo diferencia significativa con respecto a los demás, esto en cuanto a longitud del pedúnculo. Además, se obtuvo una vida floral de las rosas más prolongada que con los otros tratamientos.

En el experimento hay variables externas que pueden afectar los resultados y determinar los efectos de los tratamientos en las plantas, como la luz, temperatura, suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcántar, G., & Sandoval, V. (1999). Manual de análisis químico de tejido vegetal: guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. *Sociedad Mexicana de La Ciencia Del Suelo*, (10), 155.
- Arriaga Frías, A., De la Cruz Guzmán, G., & Mandujano Piña, M. (2016). Conductividad hidráulica en tallos florales de Rosa CV. Polo con diferente longitud. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39: 233–239.
- Botondi, R., Espito, G., Massantini, R., & Mentcarelli, F. (1998). Influence of auxins on stem bending in cut gerbera flowers. *American Society for Horticultural Science.*, 127–131.
- Callejas-Juárez, N., Matus-Gardea, J., García-Salazar, J. A., Martínez-Damián, M. A., & Salas-González, J. M. (2009). Situación actual y perspectivas de mercado para la tuna, el nopalito y derivados en el estado de México, 2006. *Agrociencia*, 43: 73–82.
- Calvache Ulloa, A. (2010). Cultivo de Rosas para Exportación (pp. 1–6). Rumipamba.
- Carrillo-Mendoza, O., Rodríguez-Alcázar, J., Cano-Medrano, R., & Lopez-Jiménez, A. (2005). Aplicación foliar de urea y sacarosa y su efecto en el acondicionamiento de planta de vivero y producción de fresa (*Fragaria×ananassa* Duch.) “CP 99-3a.” *Agrociencia*, 39.
- De Paz Acevedo, E. (2017). *Nutrición foliar con aminoácidos y edáfica mineral para la brotación de yemas basales en el cultivo rosal*. UACH.
- Díaz, A. (2007). *Efecto de estimulantes de brotación en el cultivo de Rosal Cv. Royalty*. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Navarro.”
- Doctoroff, A., Vidimos, A., & Taylor, J. (2000). Cactus Skin Injuries. *Cutis*, 65: 3–5.
- Domínguez-garcía, I. A., Granados-sánchez, M. R., Sagarnaga-villegas, L. M., & María, J. (2017). Viabilidad económica y financiera de nopal tuna (*Opuntia ficus-indica*) en Nopaltepec, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8:1371–

1382.

- Dorantes, B. M. (1984). *El cultivo del Rosal (Rosa spp) bajo condiciones de invernadero*. UACH.
- Garay Arroyo, A., De la Paz Sánchez, M., García Ponce, B., Álvarez Buylla, E., & Gutierrez, C. (2014). La homeostasis de las auxinas y su importancia en el desarrollo de *Arabidopsis Thaliana*. *Revista de Educación Bioquímica*, 33:13–22.
- IICA. (2017). *Caracterización del SIAL nopal verdura y fruta en el Estado de México*. Estado de Hidalgo: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA),.
- Mustafa-Odat, T. A., Al-Tawara-Jebreel, M., & Hussein-Hammouri, E. (2014). Prickly pear spine keratoconjunctivitis. *Middle East African Journal of Ophthalmology*, 21:61–65. <https://doi.org/10.4103/0974-9233.124100>
- Puerta, A. (2017). *Evaluación de la calidad postcosecha de tres cultivares de Gerbera jamesonii L. y del efecto de la utilización de cloruro de calcio sobre el curvado del pedúnculo floral*. Universidad Nacional del Litoral.
- Ramírez Abarca, O., Figueroa Hernández, E., & Espinoza Torres, L. (2015). Análisis de rentabilidad de la tuna en los municipios de Nopaltepec y Axapusco , Estado de México . *Revista Mexicana de Agronegocios*, 36:1999–2010.
- Romero Arellano, M. (2013). *Rendimiento y calidad de producción de cinco cultivares de rosa en el municipio de Tenancigo Estado de México*. Tesis Ing. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Suhrhoff, T. J., & Scholz-Böttcher, B. M. (2016). Qualitative impact of salinity, UV radiation and turbulence on leaching of organic plastic additives from four common plastics-A lab experiment. *Marine Pollution Bulletin*, 102:84–94. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.11.054>
- Yong, A. (2004). Revisión bibliográfica: El cultivo del rosal y su propagación. *Cultivos Tropicales*, 25: 53–67.

4. CONCLUSIONES GENERALES

El manejo integral de las glóquidas es importante para disminuir el impacto ambiental de la producción de tuna.

Las glóquidas de la tuna poseen barbas retrorsas, cuya longitud es de $1667 \pm 292 \mu\text{m}$ y diámetro de $67.3 \pm 9.56 \mu\text{m}$, comparables a las glóquidas de otras especies de Opuntias. Además, se encontró que el 83.35 % de la pared celular está compuesta por celulosa y hemicelulosa en proporciones similares. Sólo el 5.3% es lignina. Los mayores porcentajes de degradación y obtención de azúcares reductores totales se obtuvieron a partir de la hidrólisis con Ácido Sulfúrico, Ácido Fosfórico e Hidróxido de Potasio.

La hidrólisis con Ácido Sulfúrico solubilizó la mayor cantidad de minerales de las glóquidas. Con este procedimiento: K, Ca y Mg son los más abundantes; P, N y S son los de menor concentración; y entre los micronutrientes resalta el Fe por su mayor contenido.

El impacto ambiental por la cosecha del fruto de tuna es importante darle un manejo apropiado para la seguridad de las personas y disminuir la presión sobre la pérdida de nutrientes al suelo.

La aplicación de las glóquidas en cultivo de rosa bajo condiciones de invernadero, tiene potencial para ser usado como insumo en la nutrición vegetal. El tratamiento con el fertilizante 1 y 2 fueron los que obtuvieron diferencia significativa con respecto a los demás, esto en cuanto a longitud del pedúnculo. Además, se obtuvo una vida floral de las rosas más prolongada que con los otros tratamientos.

En el experimento hay variables externas que pueden afectar los resultados y determinar los efectos de los tratamientos en las plantas, como la luz, temperatura, suelo.

5. LITERATURA CITADA

- Aguilar-Rivera, N., & Canizales-Leal, M. J. (2004). Cinética de la hidrólisis ácida de la cascarilla de cebada Barley. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 3, 257–263.
- Aguilar Zamora, A. (2003). *Guía para la producción de nopal tunero en el Estado de México*. Estado de México: INIFAP.
- Aguilar Zamora, A., Jolalpa Barrera, J., & Garza García, D. (2008). *Guía para cultivar nopal tunero en el estado de Hidalgo*. Hidalgo: INIFAP.
- Alcántar, G., & Sandoval, V. (1999). Manual de análisis químico de tejido vegetal: guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. *Sociedad Mexicana de La Ciencia Del Suelo*, (10), 155.
- Arriaga Frías, A., De la Cruz Guzmán, G., & Mandujano Piña, M. (2016). Conductividad hidráulica en tallos florales de Rosa CV. Polo con diferente longitud. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(3), 233–239.
- Barrera, J., Luis, J., Zamora, A., Barreto, O., & López, G. (2011). Production and commercialization of fresh prickly pear under different modalities in Hidalgo , Mexico. *Revista Mexicana de Agronegocios Agronegocios*, 28, 605–614.
- Botondi, R., Espsito, G., Massantini, R., & Mentcarelli, F. (1998). Influence of auxins on stem bending in cut gerbera flowers. *American Society for Horticultural Science.*, 127–131.
- Callejas-Juárez, N., Matus-Gardea, J., García-Salazar, J. A., Martínez-Damián, M. A., & Salas-González, J. M. (2009). Situación actual y perspectivas de mercado para la tuna, el nopalito y derivados en el estado de México, 2006. *Agrociencia*, 43(1), 73–82.
- Calvache Ulloa, A. (2010). *Cultivo de Rosas para Exportación* (pp. 1–6). Rumipamba. Retrieved from

file:///C:/Users/LENOVO/Downloads/MANUALTECNICO-
PRACTICODELCULTIVODEROSASENELECUADOR.pdf

- Cardoso, M., Duque, A., Sáez, F., Manzanares, P., Garcia-cruz, C., & Ballesteros, M. (2016). Sugar production from wheat straw biomass by alkaline extrusion and enzymatic hydrolysis. *Renewable Energy*, 86, 1060–1068. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.026>
- Carrillo-Mendoza, O., Rodríguez-Alcázar, J., Cano-Medrano, R., & Lopez-Jiménez, A. (2005). Aplicación foliar de urea y sacarosa y su efecto en el acondicionamiento de planta de vivero y producción de fresa (*Fragaria×ananassa duch.*) “CP 99-3a.” *Agrociencia*, 39(2).
- Chahdoura, H., Morales, P., Barreira, J., Barros, L., Fernández, V., Ferreira, I., & Achour, L. (2015). Dietary fiber, mineral elements profile and macronutrients composition in different edible parts of *Opuntia microdasys* (Lehm.) Pfeiff and *Opuntia macrorhiza* (Engelm.). *Food Science and Technology*, 64, 446–451. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.011>
- CODEX STAN 247. (2005). Norma general del CODEX para zumos (jugos) y néctares de frutas. CODEX STAN 247.
- Corrales-García, J., & Flores-Valdez, C. (2003). Nopalitos y tunas, producción, comercialización, poscosecha e industrialización. Ciudad de México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Corrales García, J., & Flores Valdez, C. (2003). Nopalitos y tunas (Primera). Estado de México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Crofts, S. B., & Anderson, P. S. L. (2018). The influence of cactus spine surface structure on puncture performance and anchoring ability is tuned for ecology. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.2280>
- De Paz Acevedo, E. (2017). Nutrición foliar con aminoácidos y edáfica mineral para la brotación de yemas basales en el cultivo rosal. UACH.

- Díaz-Medina, E., Rodríguez-Rodríguez, E., & Díaz-Romero, C. (2007). Chemical characterization of *Opuntia dillenii* and *Opuntia ficus indica* fruits. *Food Chemistry*, 103(1), 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.06.064>
- Díaz, A. (2007). Efecto de estimulantes de brotación en el cultivo de Rosal Cv. Royalty. Universidad Autónoma Agraria “ Antonio Navarro.”
- Dieter, R. A., Whitehouse, L. R., & Gulliver, R. (2017). Cactus Spine Wounds: A Case Report and Short Review of the Literature. *Wounds : A Compendium of Clinical Research and Practice*, 29(2), 1–8.
- Doctoroff, A., Vidimos, A., & Taylor, J. (2000). Cactus Skin Injuries. *Cutis*, 65(5), 3–5.
- Domínguez-Domínguez, M. M., Álvarez-Castillo, A., Granados-Baeza, M., & Hernández-Campos, F. (2012). Estudio de la cinética del pretatramiento e hidrólisis ácida del bagazo de caña de azúcar. *Iberoamericana de Polimeros*, 13(4), 200–211.
- Domínguez-garcía, I. A., Granados-sánchez, M. R., Sagarnaga-villegas, L. M., & María, J. (2017). Viabilidad económica y financiera de nopal tuna (*Opuntia ficus-indica*) en Nopaltepec , Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(6), 1371–1382.
- Dorantes, B. M. (1984). El cultivo del Rosal (*Rosa spp*) bajo condiciones de invernadero. UACH.
- El-Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbaj, M. S., ... Cherkaoui-Malki, M. (2014). Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules*, 19(9), 14879–14901. <https://doi.org/10.3390/molecules190914879>
- Ford, A. M., Haywood, S. T., & Gallo, D. R. (2019). Novel Method for Removing Embedded Cactus Spines in the Emergency Department. *Case Reports in Emergency Medicine*, 2019, 1–2. <https://doi.org/10.1155/2019/6062531>

- Francisco, L. I. C., & Mayorga, J. (2011). Producción invernal de nopal de verdura.
- Garay Arroyo, A., De la Paz Sánchez, M., García Ponce, B., Álvarez Buylla, E., & Gutierrez, C. (2014). La homeostasis de las auxinas y su importancia en el desarrollo de *Arabidopsis Thaliana*. *Revista de Educación Bioquímica*, 33(1), 13–22.
- Gindl-Altmutter, W., & Jozef, K. (2012). The structure and mechanical properties of spines from the cactus. *Bioresources*, 7(1), 1232–1237.
- Gómez Trovar, F. (2008). Métodos secuenciales de pretratamiento químico y enzimático de residuos agrícolas para la producción de metano. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.
- Herrera García, E. J., Hernández, I., Tarango, L., Torres, Torres, E., Becerra Rivas, J. J., Pastor, F., ... Tiscareño Ramírez, B. (2003). Caracterización de la cadena agroalimentaria del nopal tunero e identificación de sus demandas tecnológicas. *Fundación Produce San Luis Potosí*, 1–253.
- Hewitt, E. . (1966). Sand and Water Culture Methods used in the. *Farnham Royal (Bucks), Commonwealth Agricultural Bureaux*, 22(22), 479–534.
- Hu, Z., & Wen, Z. (2008). Enhancing enzymatic digestibility of switchgrass by microwave-assisted alkali pretreatment. *Biochemical Engineering Journal*, 38(3), 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.08.001>
- IICA. (2017). Caracterización del SIAL nopal verdura y fruta en el Estado de México. Estado de Hidalgo: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA),.
- Kalegowda, P., Jagannath, D., Rajarathnam, S., & Nanjarajurs, M. (2015). Minerals of cactus (*Opuntia dillenii*): cladode and fruit. *Current Science*, 109(12), 1–4. <https://doi.org/10.18520/v109/i12/2288-2295>
- Kumar, R., Singh, S., & Singh, O. V. (2008). Bioconversion of lignocellulosic biomass: Biochemical and molecular perspectives. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 35(5), 377–391.

<https://doi.org/10.1007/s10295-008-0327-8>

- Malainine, M. E., Dufresne, A., Dupeyre, D., Mahrouz, M., Vuong, R., & Vignon, M. R. (2003). Structure and morphology of cladodes and spines of *Opuntia ficus-indica*. Cellulose extraction and characterisation. *Carbohydrate Polymers*, 51(1), 77–83. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(02\)00157-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00157-1)
- Márquez-berber, S., Torcuato-calderón, C., Almaguer- Vargas, G., Colinas-León, M. T., & Khalil Gardezi, A. (2012a). El sistema productivo del nopal tunero (*Opuntia albicarpa* y *O. megacantha*) En Axapusco, Estado de México. Problemática y alternativas. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 18(1).
- Márquez-berber, S., Torcuato-calderón, C., Almaguer- Vargas, G., Colinas-León, M. T., & Khalil Gardezi, A. (2012b). El sistema productivo del nopal tunero (*Opuntia albicarpa* y *O. megacantha*) EN Axapusco, Estado de México. Problemática y alternativas. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 18(1), 81–93.
- Martinez, J., Stewart, T., & Szeto, P. (2017). The Relationship between Structural Parameters And Mechanical Properties Of Cactus Spines. California Polytechnic State University.
- McKee, T., & Mc Kee, J. R. (2009). Bioquímica. In *Bioquímica: las bases moleculares de la vida* (Cuarta).
- Medina-Morales, M. A., Lara-Fernández, L., Aguilar, C. N., & de la Garza-Toledo, H. (2011). Aprovechamiento de materiales lignocelulósicos para la producción de etanol como carburante. *Acta Química Mexicana*, 3(6), 35–41.
- Morales, S. (2015). Hidrólisis ácida de celulosa y biomasa lignocelulósica asistida con líquidos iónicos, 21–26.
- Mussatto, S. I., Dragone, G., Fernandes, M., Rocha, G. J. M., & Roberto, I. C. (2006). Efecto de los tratamientos de hidrólisis ácida e hidrólisis alcalina en la estructura del bagazo de malta para liberación de fibras de celulosa,

5(OCTOBER), 10.

- Mustafa-Odat, T. A., Al-Tawara-Jebreel, M., & Hussein-Hammouri, E. (2014). Prickly pear spine keratoconjunctivitis. *Middle East African Journal of Ophthalmology*, 21(1), 61–65. <https://doi.org/10.4103/0974-9233.124100>
- Ochoa-Velasco, C., & Guerrero-Beltrán, J. (2010). La tuna: una perspectiva de su producción, propiedades y métodos de conservación. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 4(1), 49–63.
- Padilla Chacón, D., & Martínez Barajas, E. (2007). Factores involucrados en la distribución de azúcares en las plantas vasculares: comunicación entre los tejidos fuente y tejidos demanda. *REB*, 26(3), 99–105.
- Puerta, A. (2017). Evaluación de la calidad postcosecha de tres cultivares de *Gerbera jamesonii* L. y del efecto de la utilización de cloruro de calcio sobre el curvado del pedúnculo floral. Universidad Nacional del Litoral.
- Qiu, J., Ma, L., Shen, F., Yang, G., Zhang, Y., Deng, S., ... Hu, Y. (2017). Pretreating wheat straw by phosphoric acid plus hydrogen peroxide for enzymatic saccharification and ethanol production at high solid loading. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.040>
- Rabelo, S. C., Filho, R. M., & Costa, A. C. (2008). A Comparison Between Lime and Alkaline Hydrogen Peroxide Pretreatments of Sugarcane Bagasse for Ethanol Production. *Appl Biochem Biotechnol*, (144), 87–100. <https://doi.org/10.1007/s12010-007-8086-y>
- Ramírez Abarca, O., Figueroa Hernández, E., & Espinoza Torres, L. (2015). Análisis de rentabilidad de la tuna en los municipios de Nopaltepec y Axapusco , Estado de México . *Revista Mexicana de Agronegocios*, 36, 1999–2010.
- Ramírez, O., Figueroa, E., & Espinosa, L. E. (2015). Performance analysis of tuna in the municipalities of Nopaltepec and Axapusco , State of Mexico . *Revista Mexicana de Agronegocios*, 19, 1199–1210.

- Robinson, H. (1974). Scanning Electron Microscope Studies of the Spines and Glochids of the Opuntioideae (Cactaceae). *American Journal of Botany*, 61(3), 278. <https://doi.org/10.2307/2441606>
- Romero Arellano, M. (2013). Rendimiento y calidad de producción de cinco cultivares de rosa en el municipio de Tenancigo Estado de México. Tesis Ing. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Sáenz, C. (2007). Utilización agroindustrial del nopal. *BOLETÍN DE SERVICIOS AGRÍCOLAS DE LA FAO* (Vol. 162).
- Santini, N., Flores-Moreno, H., Ávila Muñoz, M. E., Díaz Coránguez, M., Gasteazoro Piñeiro, F., & Martorell, C. (2007). La cobertura de espinas de los cactus determina que éstos se establezcan bajo nodrizas con distinta fenología. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas*, 52(2), 36–45.
- Scheinvar, L., Olalde-Parra, G., & Gallegos-Vázquez, C. (2015). A new species of the genus *Opuntia* (Cactaceae) for the state of Veracruz, Mexico. *Botanical Sciences*, 93(1), 33–39. <https://doi.org/10.17129/botsci.133>
- Silveira-Gramont, M., Aldana-Madrid, M., Piri-Santana, J., Valenzuela-Quintanar, A., Jasa-Silveira, G., & Rodríguez-Olibarria, G. (2018). Plaguicidas agrícolas: un marco de referencia para evaluar riesgos a la salud en comunidades rurales en el Estado de Sonora, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(1), 7–21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.01>
- Suhrhoff, T. J., & Scholz-Böttcher, B. M. (2016). Qualitative impact of salinity, UV radiation and turbulence on leaching of organic plastic additives from four common plastics - A lab experiment. *Marine Pollution Bulletin*, 102(1), 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.11.054>
- Tejeda, L., Quintana, J., Pérez, J., & Young, H. (2011). Obtención de etanol a partir de residuos de poda, mediante hidrólisis ácida e hidrólisis enzimática. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 14(1), 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.015>

- Van Soest, P., Robertson, J., & Lewis, B. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583–3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Vázquez, J. L., Domínguez, J. A. Z., Mena, J., Maria, C. Y., Rivera, T., Francisco, L. I. C., & Mayorga, J. (2012). Manejo de plantaciones de nopal tunero en el Altiplano Potosino. SAGARPA.
- Vignon, M. R., Heux, L., Malainine, M. E., & Mahrouz, M. (2004). Arabinan-cellulose composite in *Opuntia ficus-indica* prickly pear spines. *Carbohydrate Research*, 339(1), 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2003.09.023>
- Yong, A. (2004). Revisión bibliográfica: El cultivo del rosal y su propagación. *Cultivos Tropicales*, 25(2), 53–67.
- Yousef, K. A., Goshinska, A. J., Bailowitz, Z. P., & Amini, R. (2017). Cactus thorn detection using bedside ultrasound. *Internal and Emergency Medicine*, 12(4), 545–546. <https://doi.org/10.1007/s11739-016-1515-6>
- Zaragoza González, L. (2014). Percepción ambiental de los productores de nopal tunero de Los Llanos de Ojuelos. Universidad de Guadalajara.