



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

**Unidad Regional Universitaria de Zonas**

**Doctorado en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en  
Zonas Áridas**

**TOLERANCIA AL ESTRÉS HÍDRICO EN TRES VARIETADES DE NOPAL  
(*Opuntia* spp): CRECIMIENTO DE PLANTA Y CLADODIOS E INDICADORES  
FISIOLÓGICOS, QUÍMICOS Y PRODUCTIVIDAD DE FORRAJE**

**TESIS**

Que como requisito parcial  
para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS EN  
RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE  
EN ZONAS ÁRIDAS**

**Presenta:**

**ROBERTO BACARRILLO LÓPEZ**

**Bajo la supervisión del Dr. Aurelio Pedroza Sandoval**

Bermejillo, Durango, México. Marzo, 2022



**APROBADA**



**inifap**  
Instituto Nacional de Investigaciones  
Forestales, agrícolas y Pecuarías

Tesis realizada por **ROBERTO BACARRILLO LÓPEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:


**DOCTOR EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE  
EN ZONAS ÁRIDAS**

DIRECTOR



Dr. Aurelio Pedroza Sandoval

CODIRECTOR



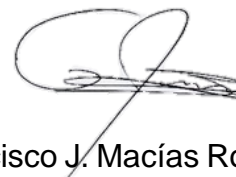
Dr. Marco Antonio Inzunza Ibarra

ASESOR



Dr. Arnoldo Flores Hernández

ASESOR



Dr. Francisco J. Macías Rodríguez

LECTOR EXTERNO

*José A. Samaniego Gaxiola*

Dr. José Alfredo Samaniego Gaxiola

## Contenido

<b>Tema</b>	<b>Página</b>
DEDICATORIA .....	viii
AGRADECIMIENTOS.....	ix
DATOS BIÓGRAFICOS .....	x
RESUMEN GENERAL.....	xi
CAPITULO I .....	1
INTRODUCCION GENERAL.....	1
JUSTIFICACION .....	6
OBJETIVOS .....	6
Objetivo general .....	6
Objetivos específicos.....	7
HIPÓTESIS .....	7
REVISION DE LITERATURA .....	8
Características del nopal .....	9
Usos del Nopal .....	10
Nopal usado como forraje.....	12
LITERATURA CITADA .....	12
CAPÍTULO II .....	18

RESPUESTA AL ESTRÉS HÍDRICO DE TRES VARIEDADES DE NOPAL  
(*Opuntia spp*): Tolerancia, crecimiento de planta y productividad de forraje . 18

RESUMEN..... 18

ABSTRACT ..... 19

INTRODUCCIÓN..... 20

MATERIALES Y MÉTODOS ..... 22

Ubicación del área de estudio. .... 22

Establecimiento del experimento ..... 22

Diseño experimental y de tratamientos..... 23

Contenido de humedad. .... 23

Variables respuesta. .... 25

Análisis de datos. .... 26

RESULTADOS Y DISCUSIÓN ..... 27

Altura de planta y crecimiento de cladodios. .... 27

Contenido relativo de agua y clorofila..... 30

Productividad..... 33

CONCLUSIONES..... 35

LITERATURA CITADA ..... 38

CAPÍTULO III .....43

INDICADORES FÍSICOS, QUÍMICOS Y FISIOLÓGICOS EN LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD DEL MÚCÍLAGO EN TRES VARIEDADES DE NOPAL ( <i>Opuntia spp</i> ) EN DIFERENTES CONTENIDOS DE HUMEDAD DEL SUELO .....	43
RESUMEN.....	44
ABSTRACT .....	44
I/INTRODUCCIÓN.....	46
MATERIALES Y MÉTODOS .....	48
Ubicación del área de estudio. ....	48
Diseño experimental y de tratamientos.....	48
Variables medidas. ....	51
Análisis de datos. ....	54
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	54
Características fisicoquímicas del mucílago de nopal. ....	54
Calidad del mucílago de la penca de nopal. ....	58
Características fisiológicas de la planta del nopal. ....	59
CONCLUSIONES.....	61
LITERATURA CITADA .....	64

## Índice de Cuadros

<b>Cuadro</b>	<b>Página</b>
<b>Capítulo II.....</b>	<b>18</b>
Cuadro 1. Efecto en el en crecimiento de cladodios a tres contenidos de humedad del suelo en tres diferentes variedades de nopal (Opuntia spp) 240 DDT. Bermejillo, Durango. ....	29
Cuadro 2. Contenido relativo de agua en tres variedades de nopal (Opuntia spp) en diferentes contenidos de humedad en el suelo. Bermejillo, Durango. ....	32
Cuadro 3 . Efecto del contenido de humedad del suelo en tres variedades de nopal (Opuntia spp) en la productividad de biomasa fresca y seca a los 240 DDT. Bermejillo, Durango. ....	37
<b>Capítulo III.....</b>	<b>43</b>
Cuadro 4. Efecto del contenido de humedad del suelo en la acidez, contenido de humedad y contenido de cenizas del mucilago en tres variedades de nopal (Opuntia spp). Bermejillo, Durango. Primavera – verano, 2020.....	57
Cuadro 5. Efecto del contenido de humedad del suelo en la cantidad y calidad del mucilago en tres variedades de nopal (Opuntia spp). Bermejillo, Durango. Primavera-verano, 2020. ....	58
Cuadro 6. Contenido de clorofila A y B y pigmentos totales en tres variedades de nopal (Opuntia spp) en diferentes contenidos de humedad del suelo. Bermejillo, Durango. Primavera-verano, 2020.....	63

## Índice de figuras

<b>Figuras</b>	<b>Página</b>
<b>Capítulo II .....</b>	<b>18</b>
Figura 1. Curva de retención de humedad del suelo del área experimental. Bermejillo. Durango.....	24
Figura 2. Comportamiento de la altura de planta en tres variedades de nopal (Opuntia spp) en diferentes contenidos de humedad en el suelo.....	30
<b>Capítulo III .....</b>	<b>43</b>
Figura 3. Curva de retención de humedad del suelo del campo experimental URUZA – UACH. Bermejillo, Durango.....	50
Figura 4. Contenido relativo de agua en el mucilago de tres variedades de nopal (Opuntia spp) bajo diferentes contenidos de humedad en el suelo. Bermejillo, Durango. México.....	60

## **DEDICATORIA**

### **A Dios:**

Por permitirme llegar hasta aquí y darme la oportunidad de seguir adelante en mis estudios.

### **A mi santa madre de Guadalupe:**

Por ser la luz que nos guía y protege a lo largo de nuestras cortas vidas.

### **A mis hijas:**

Parte fundamental de mi vida, y por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas.

### **A mis padres y hermanos que ya no están conmigo:**

Por ser la razón de que nos encontremos hoy aquí, escribiendo el final que marcara el inicio de una nueva vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al **CONACYT** por todo el apoyo que me brindó en el programa de becas para los estudios de posgrado.

A la **Universidad Autónoma Chapingo – URUZA**, en especial al Programa de Posgrado por darme la oportunidad de cursar el Doctorado en RNMAZA.

A mi director de tesis: **Dr. Aurelio Pedroza Sandoval** por su inagotable ayuda y principal soporte para la terminación de mis estudios, gracias.

A todo mi comité asesor: **Dr. Marco A. Inzunza Ibarra, Dr. Francisco J. Macias Rodríguez, Dr. Arnoldo Flores Hernández** y al lector externo: **Dr. José Alfredo Samaniego Gaxiola**, por su ayuda y valiosos comentarios.

A todos y cada una de **las personas de URUZA** que me regalaron parte de su valioso tiempo, permitiéndome dar por terminado mis estudios, gracias.

## **DATOS BIÓGRAFICOS**

### **Datos personales**

Nombre: Roberto Bacarrillo López

Fecha de nacimiento: 30 de agosto de 1970

Lugar de nacimiento: San Pedro de las colonias, Coahuila.

CURP: BALR700830HCLCPB07

Profesión: Ingeniero Industrial con opción en Eléctrica



### **Desarrollo académico**

Bachillerato: Técnico en máquinas y herramientas. Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios No. 127 (1986 - 1989).

Licenciatura: Ingeniero Industrial con opción en Eléctrica. Instituto Tecnológico de la Laguna No. 13 (1990 - 1995).

Maestría: Maestro en Ciencias en Irrigación. Instituto Tecnológico de Torreón (2013 - 2015).

Capacitación en el idioma inglés: Programa 'Preteaching' para Maestros de Inglés como lengua Extranjera (2005 - 2006), Programa Avanzado para Maestros de Inglés (2004 - 2005), Programa Integral de Inglés para Maestros (2003 - 2004) en la Escuela Normal de Torreón.

Fortalecimiento pedagógico del contenido para el área disciplinar de Humanidades (2015 - 2016) en la Universidad Pedagógica Nacional

### **Desarrollo científico**

Participación como ponente en el congreso de investigación CIESLAG, en congresos nacionales e internacionales en los que se destaca: el Congreso de Recursos Bióticos de Zonas Áridas y el Encuentro Estatal de Ciencia y Tecnología e innovación 2021 – COCYTED. Autor de la fotografía principal en la Revista Científica Ecosistemas y Recursos Agropecuarios del mes de octubre del 2021.

## RESUMEN GENERAL

El nopal (*Opuntia spp.*) es una opción viable como un complemento alimenticio en la demanda de forraje para el ganado estabulado en regiones con problemas de escasez de agua. El objetivo del presente estudio fue evaluar la respuesta de diferentes materiales genéticos de nopal en diferentes contenidos de humedad del suelo con respecto a varias características morfométricas y químicas del cladodio, como unidad productiva de forraje. Se usó un diseño de bloques al azar en un arreglo de parcelas divididas, con tres repeticiones. Las parcelas grandes fueron tres contenidos de humedad edáfica: favorable en un rango de 22 - 28%, medio 15 - 21 % y desfavorable 8 – 14%; las parcelas chicas correspondieron a tres variedades de nopal denominadas Chapingo, Narro y Escobar. En una primera fase de crecimiento y productividad, se determinó que la variedad Chapingo fue la de mejor ancho y grosor de cladodios en humedad del suelo medio (15-21%) y alto (22-28%), con valores de 15.7 y 1.1 cm y 15.2 y 1.0 cm, respectivamente. La variedad Escobar fue la que registró un mayor contenido relativo de agua (CRA) en los contenidos de humedad medio (15-21%) y bajo (8-14%), con valores de 78.1 y 63%, respectivamente, sin diferencia estadística ( $P \leq 0.05$ ) con la variedad Narro. Finalmente, la variedad Narro fue la de mejor productividad con valores de 1.77 Kg y 173.5 g de biomasa fresca y seca por planta, respectivamente, donde el número de brotes de cladodio por planta en cada variedad fue determinante en el rendimiento final de biomasa producida. En una segunda fase del estudio de la calidad del mucílago del cladodio, se identificó que la mayor presencia del mucilago, la acidez y la humedad en cladodios correspondió por el aumento de biomasa verde, la cual está directamente relacionada con la humedad en el suelo. El contenido de mucilago fue mayor en la variedad Chapingo en los contenidos de humedad del suelo alta (22-28%) y media (15-21%), lo cual se debe al grosor y ancho de sus cladodios; en contraste presenta menor cantidad de mucilago con humedad baja (8-14%), siendo mejor la variedad Narro en déficit hídrico. El contenido de clorofilas A y B fue mayor en la variedad Narro en el contenido medio de humedad del suelo; en tanto que el contenido de cenizas, sólidos totales, macro y micronutrientes, no son modificados por efecto de variedad, ni contenido de humedad.

**Palabras clave:** Estrés hídrico, cactáceas, zonas áridas, forraje, sequía, *Opuntia*.

## GENERAL ABSTRACT

*Opuntia spp.* is a viable option as a food supplement in the demand for forage for stabled cattle in regions with water scarcity problems. The objective of this study was to evaluate the response of different genetic materials of *Opuntia* in different soil moisture content with respect to some morphometric and chemical characteristics of the cladode, as a productive unit of forage. A randomized block design was used in a split-plot arrangement, with three replications. The large plots correspond to three soil moisture content: favorable in a range of 22 - 28%, medium 15 - 21% and unfavorable 8 - 14%; the small plots were three genetic materials of *Opuntia*, characterized as: Chapingo, Narro and Escobar. In a first step of growth and productivity, it was determined that Chapingo cultivar was the best in width and thickness of cladodes in medium (15-21%) and high soil moisture content (22-28%), with values of 15.7 and 1.1 cm and 15.2 and 1.0 cm, respectively. The Escobar variety was the one that registered the highest relative water content (RWC) in the medium (15-21%) and low (8-14%) moisture contents, with values of 78.1 and 63%, respectively, without statistical difference ( $P \leq 0.05$ ) with the Narro variety. Finally, the Narro variety was the one with the best productivity with values of 1.77 Kg and 173.5 g of fresh and dry biomass per plant, respectively, where the number of cladode shoots per plant in each variety was decisive in the final yield of biomass produced. In a second step of the study of the quality of the mucilage, it was identified that the greater presence of the mucilage, the acidity and the humidity in cladodes corresponded to the increase in green biomass, which is directly related to the soil moisture. The cladode mucilage content was higher in the Chapingo cultivar in the high (22-28%) and medium (15-21%) soil moisture content, which is due to the thickness and width of its cladodes; in contrast, it has a lower amount of mucilage with low soil moisture (8-14%), the Narro variety being better in water deficit. The content of chlorophylls A and B was higher in the Narro variety in the medium soil moisture content; while the ash content, total solids, macro, and micronutrients, are not modified by the effect of variety, or soil moisture content.

**Keywords:** Hydric stress, cacti, arid lands, forage, drought, *Opuntia*.

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCION GENERAL**

La situación del agua ya es crítica en varios países y regiones y es probable que este problema se intensifique en el futuro. La agricultura es el mayor consumidor de agua en el mundo con el 70 % del consumo mundial, un 10 % consumo doméstico y un 21% consumo industrial. El problema de la sobreexplotación del recurso agua y la necesidad de proteger el ambiente del incremento de los niveles de contaminación, ha adquirido relevancia internacional. La disponibilidad efectiva del agua se ha reducido por los desequilibrios que ocasiona el crecimiento de la demanda, uso ineficiente y el aumento de los niveles de contaminación (Esparza, 2014).

Por su posición latitudinal y otros efectos asociados, las zonas áridas son regiones con graves problemas de recursos hídricos, lo cual se ha agudizado al incrementarse las sequías en frecuencia e intensidad en estas regiones. Lo anterior está siendo objeto de concientización y actuación para mitigar el problema, que permita una perspectiva más promisoría para las poblaciones en lo ambiental, social y económico.

Las zonas áridas de México cubren más del 50% del territorio nacional con diferentes grados de aridez de acuerdo con diferentes parámetros físicos y biológicos, como la precipitación, temperatura, suelos y vegetación (Pedroza-Sandoval, *et al.* 2018). En estas zonas habitan aproximadamente el 18% de la población, enfrentando un clima diverso y adverso (González, 2012).

Los usos agrupados agrícola y abastecimiento público para el 2017, fue de 90.4% del volumen concesionado a nivel nacional (CONAGUA, 2018). En la Comarca Lagunera de Durango y Coahuila, uno de los principales problemas de tipo ambiental es la escasez y contaminación de los recursos hídricos, debido a la sobreexplotación del acuífero (Azpilcueta, *et al.* 2018). De los 653 acuíferos, 101 están sobreexplotados, con una recarga natural de 800 mm<sup>3</sup> en el acuífero principal, ante una extracción aproximada de 1,252 mm<sup>3</sup> y un abatimiento promedio de 1.3 m por año (CONAGUA, 2010).

Desde esta perspectiva, la región lagunera presenta un déficit de agua para riego, lo cual es una limitante en la producción agropecuaria (Guzmán-Soria, *et al.* 2006). Por lo anterior, hace que, desde hace varias décadas, se estén impulsando estrategias de investigación científica y tecnológica que mitiguen el problema del agua desde el punto social, ambiental y productivo. Algunas de estas líneas de investigación se orientan sobre una mejor gestión, uso y manejo del agua en el sector productivo, dirigido hacia mejores y más eficientes sistemas captación de agua de lluvia, conservación de la humedad edáfica, métodos de

riego, cultivos alternativos de menores requerimientos de agua y mayor beneficio productivo, entre otros (Yáñez *et al.* 2018; Pedroza *et al.* 2018).

El inventario ganadero en la comarca lagunera ha crecido de 0.981 a 1.259 millones de cabezas del 2010 al 2019, con un crecimiento medio anual de 27,813 cabezas (SIAP, 2019). En la región la producción de forraje es la mayor actividad para los campesinos, según información de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) en la Comarca. Para el periodo primavera – verano (2019-2020) el promedio anual para cultivos forrajeros fue: maíz forrajero (*Zea mays*) 54,081 ha, sorgo forrajero (*Sorghum vulgare*) 14,903 ha, sorgo en grano (*Sorghum bicolor*) 1,040 ha, y maíz en grano (*Zea mays*) 5,870 ha. En el periodo otoño – invierno los cultivos fueron predominantemente forrajeros; avena forrajera (*Avena sativa*) 17,346 ha, trigo forrajero (*Triticum aestivum*) 70 ha, triticale (*Triticosecale*) 1,361 ha. De los cultivos perennes la alfalfa (*Medicago sativa*) tuvo un promedio anual de 39,046 ha (SAGARPA-SADER, 2020) es necesaria una lámina de riego de 1.4 a 1.5 m por año, con un rendimiento de 14 a 16 t<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de materia seca; todos estos cultivos son altamente demandantes en el consumo de agua.

México, por sus condiciones agroecológicas tiene un alto potencial para la producción de nopal para diferentes fines como la producción de fruta, producción de verdura y/o producción de forraje. No obstante, actualmente la cadena productiva enfrenta diferentes problemas tanto a nivel de producción, como de comercialización en términos de rentabilidad para el productor

(SAGARPA, 2015). La producción anual de nopal en el país es aproximadamente de 812,000 t y el Estado de Morelos es el principal productor y se tiene a EE. UU. como el principal destino de exportación (SADER Morelos, 2020).

Las pencas y frutos del nopal *Opuntia* spp. son utilizados como alimentos desde antes de la colonización, los usos medicinales son muy diversos, también son usados para la extracción de pigmentos y como forraje para el ganado. En zonas áridas y semiáridas, con estaciones de sequía extensas, el nopal *Opuntia* es utilizado como alimento para el ganado, el cual es uno de los principales componentes en el crecimiento y desarrollo de la producción ganadera extensiva en países con gran déficit hídrico, proporciona un alimento que contiene un almacén natural de agua y forraje verde (Viera *et al.*, 2018). El mucilago es considerado como un buen adherente de insecticidas en plantas de cultivos, fijador de pinturas, impermeabilizantes y anticorrosivos. Existen diferentes variedades de nopal, en las cuales se encuentra el nopal forrajero, México produce 167,710 toneladas anuales, es utilizado como alimento para ganado caprino, bovino, ovino y porcino, así como aves de corral y conejos, debido a que compone una fuente alternativa de forraje muy utilizado en épocas de sequía y contribuye como energía digestible, agua y vitaminas al ganado (SADER, 2020).

El nopal para verdura y/o forraje es una opción viable como suplemento forrajero en la ganadería estabulada en la cuenca lechera de la región. Es una cactácea suculenta de ciclo fotosintético Metabolismo Ácido Crasuláceo (CAM, por sus

siglas en inglés) y una gran capacidad de retención de agua en los tejidos, lo cual le permite a este tipo de plantas adaptarse adecuadamente por su capacidad de mantener un alto potencial hídrico ante condiciones extremas de déficit hídrico (Pedroza, *et al.* 2015). Adicionalmente a su alto contenido de agua en los tejidos, la planta tiene propiedades nutricionales que la hacen atractiva para el mercado agroalimentario ya que en los tejidos poseen compuestos funcionales entre los que destacan la fibra, hidrocoloides (mucílagos), pigmentos (betalaínas y carotenoides), minerales (calcio, potasio) y algunas vitaminas como la C (SADER Morelos, 2020).

La generación de nuevas tecnologías en enriquecimiento proteínico, conforman un complemento del nopal *Opuntia* spp. usado como forraje en el periodo de sequía, ya que por ser un cultivo perenne puede ser usado en cualquier época del año. En 2011 se iniciaron estudios sobre este tópico en la parte centro-norte de México, alcanzando un gran desarrollo y validación entre 2014-2015. La tecnología mecanizada de enriquecimiento proteico del nopal a base de fermentación semisólida aeróbica de fracciones de nopal sin espinas, se reporta con una mayor eficiencia de uso en tiempo y recursos (Flores *et al.* 2014).

La presente investigación, pretende contribuir al conocimiento técnico y científico del cultivo del nopal, como una alternativa a la producción de forrajes en áreas marginadas de zonas áridas, que permita mitigar el impacto ambiental y social por la escasez y contaminación del agua.

## **JUSTIFICACION**

La región lagunera con clima semiárido es una de las principales zonas agrícolas y ganadera del país, la falta de agua es el principal problema para la producción de alimentos, que en su gran mayoría son forrajes. El nopal verdura - forraje es útil no sólo porque sobrevive a las sequías, sino también porque es más eficiente que muchas gramíneas o pastos forrajeros de hoja ancha.

El nopal *Opuntia* es una planta suculenta de ruta fotosintética ácido crasuláceo (CAM, por sus siglas en inglés) que le permite adaptarse ante condiciones de estrés hídrico, temperaturas extremas y salinidad, entre factores adversos. Debido a este sistema fotosintético especializado y el carácter suculento, la planta de nopal tiene una producción más eficiente de materia seca por unidad de agua consumida, que supera a la que presentan los pastos y leguminosas.

Asimismo, el nopal está considerado como un recurso natural de alto valor económico, debido principalmente a su uso en la alimentación humana y animal, así como por su potencial industrial y medicinal (Mondragón-Jacobo y Pérez-González, 2003).

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Contribuir en el diseño y aplicación de un paquete tecnológico y al conocimiento científico sobre el proceso de la tolerancia y productividad del cultivo del nopal como opción forrajera en la Comarca Lagunera, México.

## **Objetivos específicos**

1. Identificar la mejor respuesta en tres variedades de nopal a condiciones óptimas y adversas de humedad edáfica y su impacto en el crecimiento, fisiología y productividad.
2. Identificar la calidad y productividad del gel de nopal ante condiciones contrastantes de humedad edáfica.
3. Caracterizar el proceso químico-fisiológico de respuesta al estrés hídrico en el cultivo del nopal y la bio-productividad.

## **HIPÓTESIS**

Ho1: No hay una diferencia significativa en el crecimiento, fisiología y productividad, por efecto de variedad de nopal utilizada y la condición hídrica a que esté expuesta.

Ho2: La calidad y productividad del gel del nopal, no varía por efecto de variedad y condición de humedad edáfica.

Ho3: No existe relación del proceso químico-fisiológico de respuesta al estrés hídrico y la bioproductividad del cultivo del nopal.

## REVISION DE LITERATURA

El nopal (*Opuntia*) es una planta con metabolismo MAC (Metabolismo del Ácido Crasuláceo), desarrollada en diferentes ecosistemas a lo largo de todo el mundo, esto da como resultado un gran número de diferencias en cuanto a sobrevivencia de las plantas, propagación y potencial como cultivo. La superioridad ecológica de las *Opuntias*, concretamente el nopal es imputado a su característica principal la fijación de carbono y perdida de agua, estas ocurren primordialmente en la noche. En las plantas MAC, sus estomas son abiertos durante la noche para fijar CO<sub>2</sub>, acumulando y almacenando malato en las vacuolas de la colénquima celular. La humedad relativa y las temperaturas durante la noche son más altas y bajas respectivamente, estas disminuyen la transpiración en las plantas MAC de tres a cinco veces a comparación de las plantas C<sub>3</sub> y C<sub>4</sub>, comparativamente (Nobel, 1986).

La eficiencia en el uso del agua y la habilidad de la planta se incrementan considerablemente para resistir a los ambientes áridos y semiáridos, definidos por una baja disponibilidad de agua (200-300 mm año<sup>-1</sup>), y también en lugares donde las estaciones secas son periodos demasiados largos y con temperaturas que oscilan entre 40 a 43 °C. Las entradas de CO<sub>2</sub> y la acumulación de ácido málico son reciamente influenciadas por algunas variables ambientales tales como: la temperatura del aire, luz solar, estado hídrico de la planta, nutrientes y salinidad del suelo (Nobel, 1988).

## Características del nopal

Las plantas de nopal tienen una gran capacidad de adaptación al medio ambiente. El género *Opuntia* es una planta xerófita que ha desarrollado resistencia al estrés hídrico con base en el mantenimiento de un alto potencial hídrico. Las plantas de nopales son arbustivas, rastreras o erectas que pueden medir de 3.5 a 5 metros de altura. Cuentan con una gran cantidad de ramas, poseen tallos o cladodios suculentos y unidos, comúnmente llamados pencas, en forma de raqueta ovoide o elongada de 60-70 cm de longitud, estos contienen yemas en la parte superior, llamadas aréolas que exhiben en su cavidad espinas (Ornelas 2011). Las flores son sésiles, hermafroditas y solitarias se reproducen normalmente en la parte superior de las pencas, el color es voluble las más frecuentes van de colores rojas, naranjas, amarillas y hasta blancas. En la mayor parte del mundo la planta florece una vez al año; Sin embargo, en Chile bajo ciertas condiciones ambientales y con suministro de agua en verano, se presenta una segunda floración en marzo, que da origen a la llamada fruta “inverniza” (Sáenz, *et al.* 2006).

La clasificación de la taxonomía en los nopales es compleja. Entre los componentes más importantes se encuentran la gran variabilidad según las condiciones ambientales, encontrando frecuentemente casos de poliploidía, se reproducen en forma sexual o asexual y existen numerosos híbridos interespecíficos. Debido a lo anterior, hay una gran diversidad taxonómica, pero todos los clasifican dentro de la familia *Cactácea*. En la actualidad se ha

propuesto la clasificación de los nopales bajo el género *Opuntia*. En 1700, Tournefort designo el nombre científico, por una similitud con una planta espinosa que crecía en el poblado de *Opus* en Grecia (Sáenz *et al.* 2006).

### **Usos del Nopal**

Los usos medicinales del nopal (*Opuntia* y *Nopalea*) se remonta a los primeros colonizadores de continente americano, siendo su principal uso como alimento y después para la cura de heridas. En las épocas prehispánicas, en las regiones dominadas por los pueblos del valle de México, el cultivo y consumo del nopal tierno es debido principalmente por sus condiciones nutritivas y propiedades curativas. En sí, todo el nopal ha sido usados en la medicina tradicional prehispánica y en varios países latinoamericanos a través de los siglos.

Bazzano, *et al.* (2002) sugieren que la alimentación diaria tiene resultados efectivos en la salud, quienes indican que la ingesta diaria de frutos y cladodios está ligada con una baja incidencia de enfermedades coronarias y algunos tipos de cáncer. Los frutos y cladodios del nopal tienen altos valores de nutrientes, minerales y vitaminas, así como antioxidantes. El nopal es una fuente excelente de fotoquímicos de importancia nutraceútica (El Mostafa, *et al.* 2014).

La ingesta de nopal en su forma fresca y de tamaño mediano (11- 15 cm) ayuda en la fisiología de los seres humanos con diversos efectos positivo (Sáenz, 2002; Valencia, *et al.*, 2010). Entre los elementos más abundantes se encuentran, los polisacáridos; como el mucilago, pectina, hemicelulosa y celulosa, que son los principales formadores de la fibra en los alimentos. También puede ser

terapéutico, hipoglucemiante, auxiliar en los trastornos digestivos, enfermedades cardiovasculares, obesidad e hipocolesterolémico (Feugang, *et al.* 2006).

Galicia Villanueva *et al.* (2017) opinan sobre la amplitud de los beneficios que aporta a la salud la ingesta diaria de nopal, algunos de estos beneficios son:

- La aportación de manganeso y fósforo en la alimentación diaria, lo cual contribuye al crecimiento apropiado de los huesos y ayuda a mantener al sistema inmunológico en alerta.

- La fibra digestiva permite al cuerpo tener una sensación de satisfacción y controla el apetito, lo cual mantiene el peso y la obesidad en buen nivel. También, ayuda a la absorción adecuada de nutrientes en el intestino, aligerando el paso de los alimentos, ayuda a reducir la celulitis y la retención de líquidos.

- Su ingesta diaria aporta aproximadamente el 13% del valor diario de minerales, ya que incluye calcio, magnesio, sodio, hierro y potasio, esto ayuda en la eliminación toxinas dañinas en el cuerpo, desintoxicándolo y ayudando al buen funcionamiento del hígado.

- El contenido de vitaminas A, C, B1, B2 y B3 en los nopales, favorece al control de la diabetes y la hiperglucemia, esto baja los niveles altos de azúcar en la sangre, también ayuda a bajar los niveles de glucosa, colesterol y triglicéridos en la sangre.

## **Nopal usado como forraje**

El nopal *Opuntia* en zonas áridas se usa como alimento para los pobladores de estas áreas con bajas precipitaciones (200 a 300 mm año<sup>-1</sup>) y altos índices de evapotranspiración (evapotranspiración media anual de 2000 mm). Por ser una fuente de materia verde y alto contenido de agua también es usado para la alimentación de los diferentes ganados que se encuentran en la región: ganado caprino, bovino, ovino y porcino, así como aves de corral y conejos, siendo una buena fuente alternativa de forraje, utilizado en temporadas de sequía por aportar energía digestible, y también por contener vitaminas benéficas para el ganado. Se combinan con otros alimentos forrajeros por su bajo contenido de proteína. Estas características lo hacen especialmente útil para la alimentación animal, ya que los cladodios de nopal pueden suplir y substituir parcialmente las necesidades de agua del ganado por un largo tiempo. El consumo de 40 kg de nopal por día abastece al ganado de 35 litros de agua (SIAP, 2019).

## **LITERATURA CITADA**

- Azpilcueta-Pérez, M.E., Pedroza-Sandoval, A., Trejo-Calzada, R., Sánchez-Cohen, I. y Jacobo-Salcedo, Ma. Del R. (2018). Chemical residuality in maize (*Zea mays* L.) fields irrigated with deep well water. *Revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(13), 111-117.
- Bazzano, L.A., He, J., Ogden, L.G., Loria, C.M., Vupputuri, S., Myers, L. & Whelton, P.K. (2002). Fruit and vegetable intake and risk of cardiovascular

disease in US adults: the first national health and nutrition examination survey epidemiologic follow-up study. *Am. J. Clin. Nutr.*, 76, 93–99.

CONAGUA. (2010). Atlas Digital del Agua 2010. Contraste Regional Entre el Desarrollo y la Disponibilidad del Agua, 2008. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/atlas.html?seccion=0&mapa=8>

CONAGUA. (2018). Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 103 p.

El Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbaj, M., Latruffe, N., Lizard, G., Nasser, B. & Cherkaoui Malki, M. 2014. Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules*, 19. 14879–14901.

Esparza, Miguel. (2014). La sequía y la escasez de agua en México: Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia*, (89), 193-219.

Feugang, M. J., Konarski, P., Zou, D., Stintzing, C., y Zou, C. (2006). Nutritional and medicinal use of Cactus pear (*Opuntia* spp) cladodes and fruits. *Frontiers in Bioscience*, 1(11). 2574-2589.

Flores-Hernández, A., Macías-Rodríguez, F. J., Ortega Sánchez, J. L., Esquivel Arriaga, O., García Herrera, G., & Murillo-Amador, B. (2014). 3.3.3. Tecnología de enriquecimiento proteico como medio para aumentar la calidad del nopal como forraje. En: Desarrollos de Ingeniería Agrícola

en América Latina. Depto. Ing. Agr. Universidad Autónoma Chapingo, México. 1511-1518 p.

Galicia-Villanueva, S., Escamilla-García, P. E., Alvarado-Raya, H., Aquino-González, L. V., Serna-Álvarez, H., y Hernández-Cruz, L. M. (2017). Plantación experimental de nopal para evaluación de sistemas de fertilización y extracción de mucílago. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(5), 1087-1099.

González M. G. Las zonas áridas y semiáridas de México, y su vegetación. (2012), Primera ed. SEMARNAT-INECC. Impreso en México. 194 p.

Mondragón-Jacobo, C., Pérez-González, S. (eds.). (2003). El nopal (*Opuntia* spp.) como forraje. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Estudio FAO. Producción y protección vegetal No. 169. 172 p.

Ornelas, N. J. L. (2011). Mejoramiento Del Método de Extracción Del Mucílago de Nopal *Opuntia Ficus Indica* y Evaluación de Sus Propiedades de Viscosidad. Tesis de licenciatura, Facultad de Química y Farmacobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 92 p.

Pedroza-Sandoval, A., Trejo-Calzada, R., Sánchez-Cohen, I. Yáñez-Chávez, J.A., Cruz-Martínez, A. y Figueroa-Viramontes, U. (2018). Water harvesting and soil water retention for forage production in degraded areas in arid lands of Mexico. p. 3-23. In: *New Perspectives in Forage Crops*.

Publisher: IntechOpen, Chapter published January 2018. Edited by Ricardo Loiola Edvan and Leilson Rocha Bezerra. London, SE19SG-United Kindom, 210 p.

Pedroza-Sandoval, A. Cinthia Guadalupe Aba-Guevara, José Alfredo Samaniego-Gaxiola, Ricardo Trejo-Calzada, Ignacio Sánchez-Cohen y José Antonio Chávez-Rivero. 2015. Características morfométricas y calidad de gel en sábila (*Aloe barbadensis* M.) aplicando algaenzimas y composta. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6(1), 7-18.

Sáenz, Carme, Horst Berger, Joel Corrales, Ljubica Galletti, Inocencio Higuera, Candelario Mondragón, and Elena Sepúlveda. (2006). Utilización Agroindustrial Del Nopal. *Boletín de Servicios Agrícolas de La FAO*, 1–50.

Secretaria de Agricultura Alimentación y Desarrollo Rural del Estado Morelos (SADER Morelos)- (2020). Crece producción de nopal verdura en Morelos. Recuperado de: <https://www.gob.mx/agricultura/cdmx/articulos/el-cultivo-de-nopal-verdura-en-la-ciudad-de-mexico?idiom=es>

Secretaría de Agricultura, ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) (2015). Estudio de factibilidad para el establecimiento de cultivo de nopal (*Opuntia*) en tierras ociosas en los estados de Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato y Zacatecas con fines alimenticios, energéticos y ambientales. INFORME DETALLADO. SAGARPA-Universidad Autónoma de Zacateca. 91 p.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) (2020). El nopal, parte de la riqueza del campo mexicano. Consultado en: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-nopal-parte-de-la-riqueza-del-campo-mexicano?idiom=es>

SIAP (2019). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Información Ganadera. Recuperado de: <https://www.gob.mx/siap/documentos/poblacion-ganadera-136762>, [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/501282/Nopal\\_forrajero\\_compressed.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/501282/Nopal_forrajero_compressed.pdf)

Valencia, S.K., Brambila, P.J.J., y Mora, F.J.S. (2010). Evaluación del nopal verdura como alimento funcional mediante opciones reales. *Agrociencia*. 44(8), 955-963.

Vieira, E.L.; Batista, Â.M., Guim, A.; Carvalho, F.F.; Nascimento, A.C.; Araújo, R.F.S.; Mustafa, A.F. (2018). Effects of hay inclusion on intake, in vivo nutrient utilization and ruminal fermentation of goats fed spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* Mill) based diets. *Animal Feed Science and Technology* 141(3-4), 199-208.

Yáñez-Chávez, L.G, Pedroza-Sandoval, A., Martínez-Salvador, M., Sánchez-Cohen, I., Echavarría-Cháirez, F.G., Vázquez-Valle, M.A. y López-Santos, A. (2018). Uso de retenedores de humedad edáfica en la sobrevivencia y crecimiento de dos especies de pastos *Bouteloua curtipendula* [Michx.]

Torr. y *Chloris gayana* Kunth. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*,  
9(4), 702-718.

## CAPÍTULO II

**RESPUESTA AL ESTRÉS HÍDRICO DE TRES VARIEDADES DE NOPAL  
(*Opuntia spp*): Tolerancia, crecimiento de planta y productividad de forraje**

**ANSWER TO WATER STRESS ON THREE NOPAL CULTIVARS (*Opuntia  
spp*): Tolerance, plant growth and forage productivity**

Roberto Bacarrillo-López <sup>1</sup>, Aurelio Pedroza-Sandoval <sup>2\*</sup>, Arnoldo Flores-Hernández<sup>2</sup>, Francisco J. Macías-Rodríguez<sup>3</sup> y Marco Antonio Inzunza Ibarra<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>Estudiante de Doctorado en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, UACH.

<sup>2</sup>Profesor-Investigador de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo. Bermejillo, Durango.

<sup>3</sup>Profesor-Investigador del Centro Regional Universitario Centro Norte de la Universidad Autónoma Chapingo. Calera, Zacatecas.

<sup>4</sup>Investigador del Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícola y Pecuaria. Campo experimental Gómez Palacio, Durango.

\*Autor para correspondencia. Email: [apedroza@chapingo.uruza.edu.mx](mailto:apedroza@chapingo.uruza.edu.mx)

### RESUMEN

El nopal (*Opuntia spp*) es una alternativa forrajera eficaz en la ganadería extensiva de las zonas áridas y semiáridas ante la deficiente y errática precipitación pluvial. El objetivo de este estudio fue evaluar la tolerancia al déficit hídrico en el crecimiento de la planta y productividad de forraje en tres variedades de nopal a diferentes condiciones de humedad del suelo. Se usó un diseño

experimental de bloques al azar en un arreglo de parcelas divididas con tres repeticiones. Las parcelas grandes fueron tres contenidos de humedad edáfica: muy favorable (22 - 27%), favorable (16 - 21%) y desfavorable (10 - 15); las parcelas chicas correspondieron a tres variedades de nopal: Chapingo (Ch) Narro (N) y Escobar (E), con un total de nueve tratamientos producto factorial 3x3. La variedad Chapingo fue estadísticamente mayor ( $P \leq 0.05$ ) en ancho y grosor de cladodios en el nivel favorable de humedad del suelo (16-21%) y muy favorable (22-27%), con valores de 15.7 y 1.1 cm y 15.2 y 1.0 cm, respectivamente. En tanto que, las variedades Escobar y Narro fueron las que registraron un mayor contenido relativo de agua (CRA) en los contenidos de humedad favorable (16-21%) y desfavorable (10-15%), con valores de 78.1 y 63%, respectivamente; el contenido de clorofila no varió por efecto de ninguno de los factores de variación probados en este estudio. Finalmente, la variedad Narro fue la de mejor productividad con valores de 1.77 Kg y 173.5 g de biomasa fresca y seca por planta, equivalente a 11.8 y 1.15 t ha<sup>-1</sup> de biomasa fresca y seca, respectivamente, en corte de cladodios después de seis meses de realizado el trasplante.

**Palabras clave:** Estrés hídrico, cactáceas, zonas áridas, forraje, sequía, CAM.

### ABSTRACT

Nopal (*Opuntia* spp) is an effective forage alternative in extensive livestock farming in arid and semi-arid lands, which is a region with a deficient and erratic rainfall. The objective of this study was to evaluate the tolerance to the water deficit in the growth of the plant, and forage productivity in three nopal cultivars at different soil moisture contents. A randomized block experimental design used in a split-plot arrangement, with three replications. The large plots were three soil moisture content: very favorable (22-28%), favorable (15-21%), and no favorable (8-14%); the small plots corresponded to three nopal cultivars: Chapingo (Ch) Narro (N), and Escobar (E), which makes a total of nine treatments as results of 3x3 factorial. Chapingo cultivar was the best in width and thickness of cladodes in favorable soil moisture content (16-21%) and very favorable (22-27%) with values of 15.7 and 1.1 cm and 15.2 and 1.0 cm, respectively. Escobar, and Narro cultivars registered the highest relative water content (RWC) in favorable (16-21%) and no favorable soil moisture content (10-15%) with values of 78.1 and 63%, respectively; chlorophyll content did not affect by any variation factor probed in this study. Finally, Narro cultivar had the best productivity with values of 1.77 Kg and 173.5 g of dry and fresh biomass per plant, respectively, which equivalent to 11.8, and 1.15 t ha<sup>-1</sup> of fresh, and dry biomass, respectively, in cladodes cut to six months after nopal planting.

**Key words:** Water stress, cacti, arid zones, forage, drought, CAM.

## INTRODUCCIÓN

El agua como recurso natural renovable es fundamental para la vida humana y para los procesos de producción. Actualmente, este recurso presenta una situación vulnerable ante condiciones de escasez por la sequía, sobreexplotación del acuífero y contaminación con metales pesados y otros contaminantes tóxicos, lo cual constituye una amenaza a la salud y el ambiente. Como factor de producción, la seguridad hídrica influye en la seguridad alimentaria, a la vez que se convierte en uno de los factores a través del cual se manifiesta el impacto del cambio climático (FAO, 2013).

En México, la sobreexplotación de los acuíferos y la baja productividad del agua (1.6 Kg de materia seca m<sup>-3</sup> de agua), hace urgente el diseño y aplicación de estrategias de mayores perspectivas en el uso racional y eficiente de este recurso (CONAGUA, 2010).

En la Comarca Lagunera de los estados de Coahuila y Durango, que corresponde al área de este estudio, se ubica la principal cuenca lechera del país; se estima una explotación de ganado vacuno de 483, 397 cabezas, con una demanda diaria de 3, 732 t de materia seca (SIAP, 2019). Para satisfacer estas necesidades, en las últimas décadas se han establecido los cultivos de alfalfa (*Medicago sativa* L.), maíz (*Zea mays* L.) y sorgo (*Sorghum vulgare* H.), los cuales se cultivan en el ciclo de primavera-verano y avena (*Avena sativa* L.), mezclas de trébol (*Trifolium pratense* L.) y triticale (*X. Tríticosecale Wittmack*) como forrajes de invierno. Algunos de los factores que reducen la productividad y rentabilidad de

los sistemas de producción agropecuarios son: la limitación y alto costo del agua de riego, la degradación de suelos debido a problemas de salinidad y la poca diversidad de cultivos, entre otros (Montemayor *et al.*, 2018).

El nopal es una cactácea con capacidad para crecer y desarrollarse favorablemente ante condiciones ambientales adversos propios de las zonas áridas y semi-áridas, que lo convierte en un cultivo de gran perspectiva para este tipo de regiones marginales desde el punto de vista productivo. Es una planta suculenta de ruta fotosintética ácido crasuláceo (CAM, por sus siglas en inglés) que le permite adaptarse a condiciones de estrés hídrico, temperaturas extremas y salinidad, entre otros factores adversos (Torres-Ponce *et al.*, 2015). Debido a este sistema fotosintético especializado y el carácter suculento, la planta de nopal tiene una producción más eficiente de materia fresca y seca por unidad de agua consumida y que superan a la que presentan pastos y leguminosas (Nobel, 1988).

Durante los periodos de sequía, el arbusto con y sin espinas de *Opuntia* tiene un papel importante en el suministro de nutrientes para la cría de animales bovinos, ovinos, caprinos y fauna silvestre (Feugang *et al.*, 2006). Esta alternativa no es reciente, *Opuntia* ha desempeñado un rol importante para satisfacer la demanda de forraje en las regiones semi-áridas desde hace décadas (Reyes- Alguero *et al.*, 2005; Felker *et al.*, 2006).

El objetivo del presente estudio fue evaluar diferentes variedades de nopal en el crecimiento y producción de biomasa de cladodios, como una alternativa de

producción de forraje en condiciones de estrés hídrico en zonas áridas y semi-áridas en el norte de México.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

**Ubicación del área de estudio.** El experimento se estableció en el campo experimental de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo en Bermejillo, Durango, México. La región se ubica entre los 101° 41' y 104° 61' LO y 24° 22' y 26° 23' LN, a una altitud media de 1, 100 msnm. El área presenta una extensión montañosa y una superficie plana donde se localiza el área agrícola, la cual tiene un clima seco desértico, con lluvias en verano e invierno fresco, la precipitación pluvial media anual es 258 mm y la evaporación media anual de 2,000 mm, la temperatura media anual de 21 °C con máxima de 33.7 °C y mínima 7.5 °C (Medina *et al.*, 2005).

**Establecimiento del experimento.** El estudio se estableció en el ciclo otoño - verano del 2019 - 2020, en un área con suelo franco arcilloso. La plantación de tres variedades de nopal sin espinas con propósito de verdura y forraje corresponde a material genético proveniente del vivero de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA) de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) en Bermejillo, Dgo. México.

La plantación se realizó en forma manual, mediante excavación de una cepa en suelo seco de 30 cm de profundidad, colocando plantas de dos cladodios en doble hilera de 0.85 m de ancho entre hileras dentro de cama y 1.7 m entre camas

y una distancia de 50 cm entre plantas con arreglo topológico tres bolillos, correspondiente a una densidad de población de 6,667 plantas ha<sup>-1</sup>.

**Diseño experimental y de tratamientos.** El diseño experimental utilizado fue bloques al azar en un arreglo de parcelas divididas, con tres repeticiones. Las parcelas grandes fueron tres contenidos de humedad edáfica: muy favorable (22 - 28%), favorable (15 - 21%) y desfavorable (8 - 14%); las parcelas chicas fueron las variedades de nopal denominadas Chapingo (Ch), Narro (N) y Escobar (E), con un total de 9 tratamientos producto de la factorial 3x3. La unidad experimental fue de 4 hileras de nopal de 8 m de longitud cada una, donde la parcela útil fueron las dos hileras centrales, a partir de las cuales se seleccionaron al azar 4 plantas como tamaño de muestra para medir las variables respectivas.

**Contenido de humedad.** De acuerdo con la curva de abatimiento de humedad, determinada por el método de la olla de membrana (Richards, 1948), la capacidad de campo (CC) del suelo del área de estudio es de 25.5% de humedad edáfica; en tanto que el punto de marchitez permanente (PMP) fue de 13.1% (Figura 1). Las constantes de humedad de CC y PMP, fueron el referente para establecer los contenidos de humedad probados en este estudio (muy favorable, favorable y desfavorable), especificando que el nivel desfavorable (10-15%) se llevó en su nivel mínimo por debajo del PMP anteriormente identificado, para asegurar que la planta llegara a una condición de estrés hídrico, considerando que el nopal es una especie suculenta que evade el estrés hídrico a base de conservar altos potenciales hídricos dentro de sus tejidos (Pedroza, 1975).

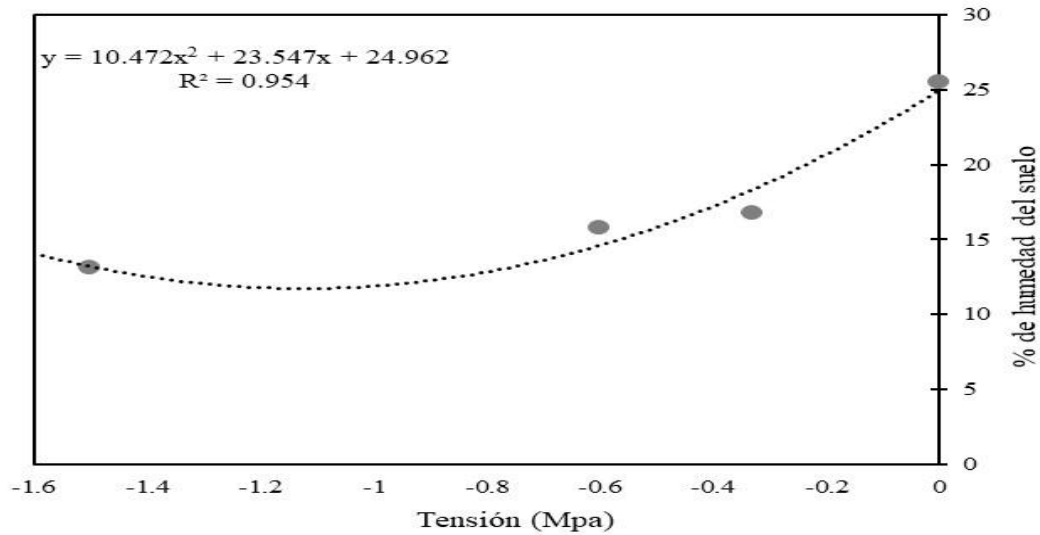


Figura 1. Curva de retención de humedad del suelo del área experimental. Bermejillo, Durango, México.

Para el establecimiento de los tratamientos de humedad del suelo, se usó un sistema de riego presurizado a partir de una regadera principal de PVC con conexiones laterales para cada parcela grande controladas mediante llave de paso, que permitieron programar en tiempo los riegos a través de cintilla con goteros distantes 0.5 m entre ellos. Para los tratamientos de contenido de humedad, se determinaron diferentes características fisicoquímicas del suelo, tales como: densidad aparente de  $1.2 \text{ g cm}^{-3}$ , capilaridad de  $L = 2.3669T^{0.4215}$  (L en cm y T en min), velocidad de infiltración de  $1.3 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ , evapotranspiración media diaria de 11 mm y coeficiente experimental de evaporación de 70 %. El cálculo del tiempo de riego se hizo conforme a la metodología citada por Pedroza y Durán (2005) y suministro controlado de agua de acuerdo a lo reportado por Jiménez- Galindo & Acosta-Gallegos (2013).

Para identificar el contenido de humedad en el suelo, éste fue monitoreado constantemente con uso de un medidor digital (Soil Tester modelo HB-2) con lectura en tiempo real. Para ello, después del riego inicial estandarizado a capacidad de campo, se dejó abatir la humedad edáfica de acuerdo con los tratamientos de humedad del suelo: muy favorable, favorable y desfavorable, procediendo a los riegos de recuperación cuando se detectó un abatimiento de 5 % en cada uno de los tres niveles de humedad probados en este estudio.

**Variables respuesta.** Las variables se midieron 240 días después del trasplante (DDP), correspondiente a un período aproximado de seis meses y se clasificaron en las siguientes categorías: morfológicas, las cuales están relacionadas a crecimiento de planta (cm) y cladodios, éstos últimos referido a longitud (cm), ancho (cm) y grosor (cm), con uso flexómetro y vernier, ambos marca Truper; fisiológicas, referidas al índice de clorofila, medida con uso de determinador de clorofila Marca Spectrum Technologies Inc. Fieldscout CM 1000 y, el estado hídrico de las plantas de nopal, mediante la determinación del contenido relativo de agua (CRA) (%), de acuerdo a la metodología reportada por Kramer (1983), donde se aplicaron las siguientes ecuaciones:

$$CRA = \frac{\text{Peso fresco} - \text{Peso seco}}{\text{Peso turgente} - \text{Peso seco}} \times 100(\%)$$

$$DH = \frac{\text{Peso turgente} - \text{Peso seco}}{\text{Peso fresco} - \text{Peso seco}} \times 100$$

$CRA = 100 - DH$ . Dónde: CRA: contenido relativo de agua; DH: déficit hídrico.

Finalmente se obtuvo el número de cladodios por planta, peso fresco de biomasa (Kg) y peso seco de biomasa (g), los dos últimos determinados mediante uso de balanza granataria. Para la determinación del peso de biomasa fresco y seco se cortaron cuatro cladodios de cada planta, posteriormente el promedio de estos valores fue multiplicado por el número total de cladodios por planta. Para el peso seco, los cladodios fueron cortados en línea recta a todo lo largo del borde, posteriormente fueron secados en una estufa a 65 °C por 7 días. Con base en ello se proyectó la producción de forraje fresco por hectárea de acuerdo con la densidad de plantación por unidad de superficie aplicada en este estudio.

**Análisis de datos.** Con la base de datos se realizaron análisis de varianza y prueba de rango múltiple de medias Tukey para identificar el efecto de tratamiento, mediante uso del programa estadístico Minitab 16 y SAS versión 9.0. Para el análisis de regresión se usó el Programa Excel 2016.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Altura de planta y crecimiento de cladodios.** El ancho y grosor del cladodio no fueron afectados en el contenido de humedad desfavorable (10-15%), pero estas variables fueron significativamente mayores ( $P \leq 0.05$ ) en la variedad Chapingo en los contenidos de humedad muy favorable (22-27%) y favorable (16-21%), con valores de 15.7 y 1.1 cm y 15.2 y 1.0 cm, respectivamente. Las variedades Escobar y Narro, fueron estadísticamente menores para estas dos variables y sin diferencia estadística entre ambas (Cuadro 1). Estos resultados son coincidentes con lo reportado por Alessio *et al.* (2016), en un estudio con plantas de *Opuntia* en macetas sin riego, donde la sequía disminuyó el grosor del cladodio y el crecimiento de este; los cladodios más jóvenes perdieron agua más tardíamente que los más viejos. López-Collado *et al.* (2013), encontraron diferencias estadísticas ( $p \leq 0.05$ ) entre variedades en longitud, ancho y grosor de brotes de cladodios; el promedio de longitud de cladodio para los materiales genéticos NTV fue de 6.82 cm, NDV de 6.66 cm, NTR de 7.78 cm y NTSS 6.03 cm; en ancho de cladodio la NTV de 1.4 cm, NDV 1.6 cm, NTR 1.8 cm y NTSS 3.4 cm; en grosor, la NTV tuvo en promedio de 0.3 cm, NDV 0.3 cm, NTR 0.5 cm y NTSS 0.3 cm.

Lo anterior significa que, en este estudio hay un efecto de variedad según el contenido de humedad del suelo, principalmente en el ancho y grosor del cladodio en los contenidos de humedad favorable y muy favorable y, en el contenido desfavorable, las tres variedades se comportan igual, esto sugiere que, en casos de déficit hídrico por falta de disponibilidad suficiente de agua en alguna de sus

fuentes, lluvia o riego, cualquiera de las tres variedades puede ser utilizada sin impacto negativo en el crecimiento de cladodio, que es la unidad básica de forraje. En cambio, cuando hay disponibilidad hídrica favorable o muy favorable, la mejor opción es la variedad Chapingo, en términos de mejor ancho y grosor del cladodio.

La longitud de cladodio (Cuadro 1) y altura de la planta (Figura 1) no hubo ningún efecto por variedad en los diferentes contenidos de humedad del suelo probados en este estudio. Aun cuando la longitud del cladodio fue mejor que lo reportado por Sánchez *et al.* (2018) y por Ruiz-Espinoza *et al.* (2008), con valores de 10.76 - 11.55 cm y un promedio de 20 cm, respectivamente, en este estudio los valores de longitud de cladodio, dependieron del contenido de humedad en el suelo, con valores de 27.2, 23.8 y 17.5 cm en contenidos de humedad muy favorable, favorable y desfavorable, respectivamente; en cambio la altura de planta fue menor en este estudio (39.5 a 67.6 cm) a lo reportado por Ferreira *et al.* (2003) quienes mostraron valores en un rango 70-122 cm en nopal forrajero *Opuntia fícus-indica* Mill. Esto podría estar relacionado tanto a la diferencia del material genético utilizado, como al tiempo de corte de los cladodios, el cual fue de 12 meses en lo reportado por estos autores y de seis meses en el presente estudio.

Cuadro 1. Efecto en el crecimiento de cladodios a tres contenidos de humedad del suelo en tres diferentes variedades de nopal (*Opuntia* spp) 240 DDT. Bermejillo, Durango.

VARIEDAD DE NOPAL	CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SUELO (%)								
	MUY FAVORABLE E  (22 – 27)			FAVORABLE  (16 – 21)			DESFAVORABLE  (10 – 15)		
	LC	AC	GC	LC	AC	GC	LC	AC	GC
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
Chapingo	27.2 a	15.7 a	1.1 a	23.8 a	15.2 a	1.0 a	16.8 a	10.5 a	0.66 a
H. Escobar	28.5 a	14.3 ab	0.89 b	24.2 a	12.5 b	0.81 b	17.5 a	9.3 a	0.55 a
Narro	27.8 a	13.5 b	0.83 b	25.2 a	12.9 b	0.85 b	18.4 a	9.9 a	0.53 a
<b>Promedio</b>	<b>27.8</b>	<b>14.5</b>	<b>0.94</b>	<b>24.4</b>	<b>13.5</b>	<b>0.88</b>	<b>17.5</b>	<b>9.9</b>	<b>0.58</b>

Prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Cifras con la misma letra dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. LC= Longitud de cladodio AC= Ancho de cladodio GC= Grosor de cladodio DDT= Días después del trasplante

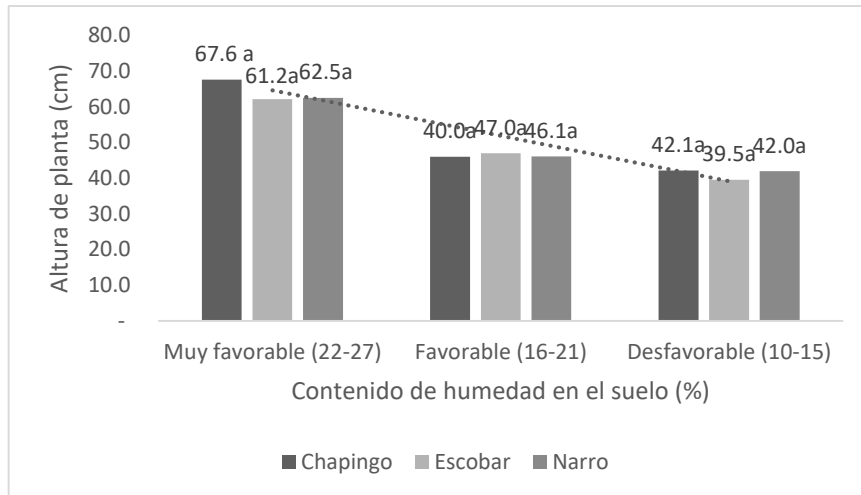


Figura 2. Comportamiento de la altura de la planta en tres variedades de nopal (*Opuntia* spp) en diferentes contenidos de humedad en el suelo. Prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Cifras con las mismas letras dentro de cada contenido de humedad del suelo, son estadísticamente iguales.

**Contenido relativo de agua y clorofila.** El contenido hídrico de las plantas ante condiciones de estrés es de vital importancia para la sobrevivencia y la productividad. El contenido relativo de agua (CRA) es el indicador más común para medir el estado hídrico de los tejidos en la planta, es la medida del contenido de agua respecto del total que los tejidos pueden almacenar y se expresa en porcentaje. Se relaciona con el potencial hídrico, ya que éste y sus componentes, potencial de presión y potencial osmótico, están en función del volumen de agua del protoplasma (Argentel *et al.*, 2006).

De esta manera, el contenido relativo de agua (CRA) tuvo un comportamiento un tanto inverso al de crecimiento de los cladodios del nopal, ya que fue

significativamente más bajo en la variedad Chapingo en los contenidos favorable y desfavorable de humedad del suelo, con valores de 68.1 y 36.6%, respectivamente, respecto de la variedad Escobar que registró la mejor respuesta con valores de 78.1 y 63%, respectivamente; sin diferencia significativa de la variedad Narro con ésta última, ni tampoco en ninguna de las tres variedades en el contenido muy favorable de humedad (Cuadro 2).

Lo anterior significa que las variedades Escobar y Narro, son las que tienen la mayor capacidad de retención de agua en sus tejidos en condiciones favorables y desfavorables de humedad del suelo, lo cual sugiere una mejor respuesta de comportamiento productivo ante condiciones de estrés hídrico. En tanto que la variedad Chapingo, se puede considerar como la más tolerante al déficit hídrico, puesto que, a pesar de soportar los niveles más bajos de contenido relativo de agua, mantiene una adecuada respuesta de crecimiento en ancho y grosor de cladodio, al menos en el nivel favorable de humedad edáfica (16-22%). Pedroza y Gómez (2006), indican que los materiales genéticos de mejor respuesta a la tolerancia al estrés hídrico son aquellos que tienen mayor capacidad de soportar bajos potenciales hídricos en sus tejidos, aunque ello signifique un detrimento en productividad. Las tres variedades de nopal tienen la misma capacidad de retención de agua en sus tejidos ante condiciones favorables de humedad en el suelo.

Adicionalmente, no hubo ningún efecto de respuesta en el índice de clorofila en las tres variedades dentro de cada contenido de humedad del suelo. Este

resultado es contrario a lo identificado por Meléndez *et al.* (2006) y Trujillo *et al.* (2010), quienes reportaron que el contenido de clorofila aumenta en suelos con bajos gradientes de humedad y disminuye en suelos con altos gradientes de humedad. Aguilar y Peña (2006), en un estudio realizado en *Opuntia ficus-indica*, reportaron que las plantas bajo sequía severa (sin ningún riego) se redujo significativamente la concentración de clorofilas; en la clorénquima la clorofila a+b disminuyó en 42.3 %, la clorofila a en 34.2 % y la clorofila en b 31.4 %; en el parénquima, los decrementos fueron de 39.6 %, 35.8 % y 23.6 %, respectivamente.

Cuadro 2. Contenido relativo de agua en tres variedades de nopal (*Opuntia spp*) en diferentes contenidos de humedad en el suelo. Bermejillo, Durango.

VARIEDAD DE NOPAL	CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SUELO (%)					
	MUY FAVORABLE (22 – 27)		FAVORABLE (16 – 21)		DESFAVORABLE (10 – 15)	
	CRA (%)	CLOR	CRA (%)	CLOR	CRA (%)	CLOR
Chapingo	77.9 a	142.2 a	68.1 b	144.5 a	36.6 b	147.5 a
Escobar	82.8 a	143.4 a	78.1 a	144.4 a	63.0 a	147.5 a
Narro	77.5 a	144.3 a	77.9 a	144.0 a	62.6 a	147.0 a

Prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. CRA= Contenido relativo de Agua, CLOR= Clorofila.

**Productividad.** El número de cladodios por planta (NCP) fue significativamente mayor ( $P \leq 0.5$ ) en las variedades Narro y Escobar, sin diferencia estadística entre ambas, con valores de 8, 6.7 y 5.2 en los contenidos muy favorable, favorable y desfavorable de humedad edáfica, respectivamente, en relación con los valores más bajos obtenidos en la variedad Chapingo, correspondientes a 6, 4 y 2.8, respectivamente. La variedad Narro, mostró un comportamiento de tendencia intermedia con respecto a las otras dos variedades en los contenidos favorable y desfavorable de humedad en el suelo (Cuadro 2).

Lo anterior sugiere que, aun cuando la variedad Chapingo mantuvo un adecuado comportamiento en el ancho y grosor de hoja y una adecuada tolerancia al estrés hídrico al soportar potenciales hídricos bajos, este último pudiera haber repercutido en su capacidad reproductiva con un más bajo número de brotes nuevos de cladodios a partir del par de cladodios madres trasplantados. López-Collado (2013), reportó que el material genético de nopal identificado como NDV fue el que presentó un mayor número de brotes con un valor de 43.5, respecto de otros materiales genéticos evaluados. La producción de brotes de cladodios del presente estudio, son menores a los reportados por Ruiz-Espinoza *et al.* (2008) e inferiores a los obtenidos por Sánchez *et al.* (2018) con registro de 10.7 a 11.15 en brotes de cladodios por penca madre, en tanto que en el presente

estudio se obtuvieron valores que variaron de 4 a 7.4 (Cuadro 3). Lo anterior, pudiera estar asociado a la diferencia de período del trasplante al corte de los cladodios. Adicionalmente, se ha reportado que la tolerancia al estrés hídrico, en términos de sobrevivencia, tiene como repercusión una menor capacidad productiva en las plantas (Pedroza, 1995).

Respecto a la producción final de forraje en términos de peso fresco y seco de biomasa por planta medida 240 DDT (6 meses), la variedad Narro fue la de mejor respuesta, con respecto a las variedades Escobar y Chapingo, con valores de 1.77, 1.52 y 1.26 Kg de peso fresco y de 173.5, 149.7 y 124.5 g de peso seco, respectivamente; la variedad Escobar tuvo una respuesta intermedia entre las variedades Narro y Chapingo, ésta última la de menor respuesta estadística (Cuadro 3). Este efecto diferencial entre variedades podría estar asociados al número de brotes nuevos de cladodios por planta que tuvo cada variedad, más que el crecimiento del cladodio o el contenido relativo de agua (CRA). Las dos variables de productividad de biomasa (peso fresco y peso seco), no tuvieron ningún efecto de respuesta entre variedades, en los contenidos favorable y desfavorable de humedad.

Las variables finales de productividad del nopal en términos forrajeros, es el peso fresco de biomasa, en tanto que el peso seco podría tener algún potencial industrial en la comercialización de polvo de nopal y otros cultivos con fines de suplemento alimenticios (Pedroza y Gómez, 2006). No obstante, en ambos casos, ante condiciones de buena disponibilidad hídrica, la mejor opción resultó

ser la variedad Narro principalmente por su mayor capacidad reproductiva de cladodios; en tanto que, en condiciones favorables y desfavorables de disponibilidad hídrica, cualquiera de las tres variedades probadas en este estudio puede ser utilizada.

En una proyección de los resultados de la producción de forraje por hectárea se tiene que, considerando la densidad de plantas en el experimento fue de 6,667 plantas  $\text{h}^{-1}$ , se reportan rendimientos finales de 8.4, 10.1 y 11.8  $\text{t ha}^{-1}$  de biomasa fresca y de 0.83, 0.998 y 1.156  $\text{t ha}^{-1}$  de biomasa seca en corte de cladodios a los seis meses de realizado el trasplante, en las variedades Chapingo, Escobar y Narro, respectivamente, correspondiente a la variedad Narro como la de mejor respuesta en la condición más favorable de humedad (22-27%). Estos valores son superiores a los encontrados por Sánchez *et al.* (2017) entre 0.347 a 0.447  $\text{t ha}^{-1}$  de biomasa seca, bajo diferentes densidades de población *Opuntia ficus-indica*. En tanto que Flores-Hernández *et al.* (2019), reportaron productividad de biomasa fresca de nopal entre 106.4 y 199.5  $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$  en altas densidades de plantación. La comparación de rendimientos en diferentes estudios podría no ser muy objetiva, ya que depende del material genético utilizado, condiciones de manejo y ambientales y la densidad de población utilizada, entre otros factores.

## CONCLUSIONES

La variedad Chapingo fue la de mejor respuesta en ancho y grosor de cladodios en condiciones de humedad del suelo favorables (16-21%) y muy favorable (22-27%), con valores de 15.7 y 1.1 cm y 15.2 y 1.0 cm, respectivamente; en tanto

que, en términos de contenido relativo de agua (CRA), la mejor variedad fueron las variedades Escobar y Narro en los contenidos de humedad favorable (16-21%) y desfavorables (10-15%), con valores significativamente ( $P \leq 0.05$ ) más altos de retención de agua en los tejidos, respecto de la variedad Chapingo. En términos de productividad, el número de cladodios por planta (NCP) fue significativamente mayor ( $P \leq 0.5$ ) la variedad de nopal Escobar, 8, 6.7 y 5.2 en los contenidos muy favorable, favorable y desfavorable bajo de humedad edáfica, respectivamente, sin diferencia estadística con la variedad Narro en el contenido muy favorable de humedad y una respuesta de tendencia intermedia entre las variedades Chapingo y Escobar en los contenidos favorable y desfavorable. Finalmente, la variedad Narro fue la de mejor productividad con 1.77 Kg y 173.5 g de biomasa fresca y seca por planta, equivalente a 0.998 y 1.156 t ha<sup>-1</sup> de biomasa fresca y seca, respectivamente. La altura de planta, longitud de cladodio e índice de clorofila, no fueron afectadas por la variedad de nopal utilizada en ninguno de los contenidos de humedad evaluados en este estudio.

Cuadro 3 . Efecto del contenido de humedad del suelo en tres variedades de nopal (*Opuntia spp*) en la productividad de biomasa fresca y seca a los 240 DDT. Bermejillo, Durango.

VARIEDAD DE NOPAL	CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SUELO (%)								
	ALTO			MEDIO			BAJO		
	(22 – 27)			(16– 21)			(10 – 15)		
	PFBP	PSBP	NCP	PFBP	PSBP	NCP	PFBP	PSBP	NCP
(Kg)	(g)		(Kg)	(g)		(Kg)	(g)		
Chapingo	1.26 b	124.5 b	6.0 b	1.06 a	105.6 a	4.0 b	0.44 a	44.1 a	2.8 b
Escobar	1.52 ab	149.7 ab	8.0 a	1.28 a	127.9 a	6.7 a	0.38 a	37.7 a	5.2 a
Narro	1.77 a	173.5 a	8.3 a	1.05 a	104.2 a	5.9 ab	0.44 a	43.6 a	4.2 ab
<b>Promedio</b>	<b>1.51</b>	<b>149.2</b>	<b>7.4</b>	<b>1.13</b>	<b>112.5</b>	<b>5.5</b>	<b>0.42</b>	<b>41.8</b>	<b>4.0</b>

Prueba de Tukey ( $\leq 0.05$ ). Cifras con la misma letra dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. PFBP= Peso fresco de biomasa por planta PSBP= Peso seco de biomasa por planta NCP= Número de cladodios por planta.

## LITERATURA CITADA

- Aguilar, B. G. y Peña, V. C. B. (2006). Alteraciones fisiológicas provocadas por sequía en nopal (*Opuntia ficus-indica*). Rev. Fitotec. Mex. 29 (3): 231-127.
- Alessio, S., Brunella, M., Paoloinglese and Riccardo Lo B. (2016). Cladode growth dynamics in *Opuntia ficus-indica* under drought. Environmental and Experimental Botany 122: 158-167.
- Argentel, L., González, L. M., Ávila, C. y Aguilera, R. (2006). Comportamiento del contenido relativo de agua y la concentración de pigmentos fotosintéticos de variedades de trigo cultivadas en condiciones de salinidad. Cultivos Tropicales 27(3): 49-53
- CONAGUA. 2010. Comisión Nacional del Agua. Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Año agrícola 2008-2009. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F. 323 p. Consultado en <https://www.gob.mx/siap/documentos/poblacion-ganadera-136762>
- FAO (2010). Tecnologías para el uso sostenible del agua. Oficina Subregional de FAO para Mesoamérica. Edificio 238, Ciudad del Saber, Clayton, Panamá. Consultado en [www.fao.org](http://www.fao.org)
- Felker, P., Paterson, A., and J. Felker, M. M. (2006). Forage potential of *Opuntia* clones maintained by the USDA, National Plant Germoplasm System (NPGS) Collection. Crop Sci. 46:2161- 2168.

Ferreira, C. A., Ferreira, R. L. C., Santos D. C., Santos, M. V. F., Silva, J. A. A., Lira, M. A. y Molica, S. G. (2003). Utilização de técnicas multivariadas na avaliação da divergência genética entre clones de palma forrageira (*Opuntia ficus indica* Mill). Rev. Bras. Zootec. 32(6):1560-1568.

Feugang, J. M., Konarski, P., Zou, D., Stintzing, F. C. and Zou, C. (2006). Nutritional and medicinal use of cactus pear (*Opuntia* spp.) cladodes and fruits. Front. Biosci. 11:2574-2589.

Flores-Hernández, A., Macías, R. F. J., Esparza-Ibarra, E. L., Quiñones-Zaldivar, A., Murillo-Amador, M., García- Hernández, J. y Rueda-Puente, E.O. (2019). Evaluación del nopal forrajero (*Opuntia* spp) en el Norte de México como opción para su enriquecimiento proteico. SOMAS, pp. 1474-1489. Consultado en:

Jiménez-Galindo, J. C. y Acosta-Gallegos, J. A. (2013). Rendimiento de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) y Tépari (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) bajo el método riego-sequía en Chihuahua. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 4(4): 557-567

Kramer, P. J. Water relation of plants. (1983). New York Academic Press, 475 p.

López-Collado, C. J., Malpica-Vázquez, A., López -Collado, J., García-Pérez, E., & Sol Sánchez, Á. (2013). Crecimiento de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en la zona central de Veracruz. Revista mexicana de ciencias agrícolas 4(SPE5): 1005-1014.

- Medina, G. G., G. Díaz P., J. López H., J. A. Ruíz C. y M. Marín S. 2005. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Durango. (Periodo 1961 – 2003). Libro Técnico № 1. Campo Experimental Valle del Guadiana. CIRNOC-INIFAP. 224 p.
- Meléndez, L., Hernández, A. y Fernández, S. (2006). Efecto de la fertilización foliar y edáfica sobre el crecimiento de plantas de maíz sometidas a exceso de humedad en el suelo. *Bioagro* 18 (2):107-114.
- Montemayor-Trejo, J. A., Suárez-González, E., Munguía-López, J. P., Segura-Castruita, M. Á., Mendoza Villarreal, R., & Woo-Reza, J. L. (2018). Acolchados plásticos para la producción de maíz (*Zea mays* L.) forrajero en la Comarca Lagunera. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 9 (SPE20): 4107-4115.
- Nobel, P. S. (1988). Environmental biology of agaves and cacti. New York: Cambridge Univ. Press, USA. 284 pp.
- Pedroza, S.A. y Durán, B.S. (2005). Efecto del acolchado plástico, fertilización nitrogenada y composta orgánica en el crecimiento y desarrollo de sábila *Aloe barbadensis* Miller, con riego por goteo presurizado. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas* 4: 1-7.
- Pedroza S. A. (1995). El déficit hídrico en las plantas. Principios y técnicas de manejo. Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas-Universidad Autónoma Chapingo. Bermejillo, Dgo. 162 pp.

Pedroza, S.A. y Gómez, L.F. (2006). La Sábila. Propiedades, Manejo Agronómico, Proceso Agroindustrial y de Mercado. Universidad Autónoma Chapingo. Editorial Chapingo. DR © Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Publicaciones de la Dirección General de Difusión Cultural y Servicio. 147 pp.

Richard L. A. (1948) Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science* 66:105-110.

Reyes-Agüero J. A.; Aguirre-Rivera, J. R. y Hernández, H. (2005). Notas Sistémicas y descripción detallada de *Opuntia ficus indica* (L.) Mill Cactácea. *Agrociencia*. 39:395-408.

Ruiz-Espinoza, F.H., Alvarado-Mendoza, J.F., Murillo-Amador, B., García-Hernández, J.L., Pargas-Lara, R., Duarte-Osuna, D.O. y Fenech-Larios, L. (2008). Rendimiento y crecimiento de nopalitas de cultivares de nopal (*Opuntia ficus-indica*) bajo diferentes densidades de plantación. *J. PACD* 10: 22-35.

Sánchez, H., Ochoa, G., Alfaro, R., & Peña, P. (2017). Evaluación de la capacidad forrajera de *Opuntia ficus*. *Manglar* 14(2): 115-124.

SIAP (2019). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Información Ganadera. Consultado en el mes de julio del 2021. <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>

Torres-Ponce, R. L., Morales-Corral, D., Ballinas-Casarrubias, M. D. L., & Nevárez-Moorillón, G. V. (2015). El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(5), 1129-1142.

Trujillo, M. E., Méndez, J. R., Hossne, A. J., & Parra, F. J. (2010). Efecto de la humedad y compactación de un Ultisol de la sabana del estado Monagas sobre la concentración de clorofila y carotenoides, lavado de electrolitos y contenido relativo de agua en plantas de soya. *Acta Universitaria* 20(3): 18-30.

## **CAPÍTULO III**

### **INDICADORES FÍSICOS, QUÍMICOS Y FISIOLÓGICOS EN LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD DEL MÚCÍLAGO EN TRES VARIEDADES DE NOPAL (*Opuntia spp*) EN DIFERENTES CONTENIDOS DE HUMEDAD DEL SUELO**

#### **PHYSICAL, CHEMICAL, AND PHYSIOLOGICAL INDICATORS ON THE MUCILAGE PRODUCTION AND QUALITY IN THREE CULTIVARS OF NOPAL (*Opuntia spp*) IN DIFFERENT SOIL MOISTURE CONTENTS**

Roberto Bacarrillo-López <sup>1</sup>, Aurelio Pedroza-Sandoval <sup>2\*</sup>, Arnoldo Flores-Hernández<sup>2</sup>, Francisco J. Macías-Rodríguez<sup>3</sup>, Marco A. Inzunza Ibarra<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>Estudiante de Doctorado en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, UACH.

<sup>2</sup>Profesor-Investigador de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo. Bermejillo, Durango.

<sup>3</sup>Profesor-Investigador del Centro Regional Universitario Centro Norte de la Universidad Autónoma Chapingo. Calera, Zacatecas.

<sup>4</sup>Investigador del Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícola y Pecuaria. Campo experimental Gómez Palacio, Durango.

\*Autor para correspondencia. Email: apedroza@chapingo.uruza.edu.mx

## RESUMEN

Los derivados del mucílago del nopal (*Opuntia spp*) están adquiriendo importancia en el mercado internacional por sus múltiples beneficios en diferentes campos de la industria. El objetivo de este estudio fue determinar algunas características fisicoquímicas y fisiológicas como precursoras en la producción y calidad del mucílago en tres variedades de nopal bajo diferentes regímenes de humedad en el suelo. Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar en un arreglo de parcelas divididas con tres repeticiones. Las parcelas grandes fueron tres contenidos de humedad edáfica: óptimo (22-28 %), medio (15-21 %) y subóptimo (8-14 %); las parcelas chicas correspondieron a tres variedades de nopal: Chapingo (Ch), Narro (N) y H. Escobar (HE). La variedad Chapingo presentó mayor cantidad de mucílago en condiciones medias (15-21%) y óptimas (22-28%) de humedad del suelo, con valores de 800 y 712.6 ml, respectivamente. Las tres variedades no mostraron diferencias estadísticas ( $P \leq 0.05$ ) en la acumulación de elementos inorgánicos y polisacáridos. La variedad Narro mostró mayores valores de Clorofila A y Pigmentos totales en el contenido medio de humedad del suelo (15-21%), con valores de 10.36 % y 2037.6 mg m<sup>-2</sup>, respectivamente. La variedad Chapingo mostró un efecto de mayor contenido de Clorofila B en los diferentes contenidos de humedad del suelo. Desde el punto de vista de la producción de mucílago y estabilidad de la clorofila, la variedad Chapingo es la mejor opción bajo condiciones favorables de humedad edáfica, en tanto que las variedades Narro y H. Escobar, son la mejor opción al registrar valores de contenido relativo de agua, como indicador de la tolerancia al déficit hídrico en condiciones subóptimas de humedad del suelo.

**Palabras clave:** Productos industriales, fisiología del estrés, zonas áridas, plantas suculentas, sequía.

## ABSTRACT

The derivatives of the nopal (*Opuntia spp*) mucilage are acquiring importance in the international market due to their multiple benefits in different focus of the industry. The objective of this study was to determine some physical-chemical and physiological characteristics as precursors in the production and quality of the mucilage in three varieties of nopal under different soil moisture regimes. A randomized block experimental design was used in a split plot with three replications. The large plots were three-soil moisture content: optimal (22-28 %), medium (15-21 %) and suboptimal (8-14 %); small plots corresponded to three varieties of nopal: Chapingo (Ch), Narro (N), and H. Escobar (HE). Chapingo variety presented the highest amount of mucilage in medium (15-21 %) and optimal (22-28 %) soil moisture conditions, with values of 800 and 712.6 ml, respectively. None of the three varieties showed a statistical differences ( $P \leq 0.05$ )

in the accumulation of inorganic elements and polysaccharides. Narro variety registered higher values of Chlorophyll A and total Pigments in the average soil moisture content (15-21 %), with values of 10.36% and 2037.6 mg m<sup>-2</sup>, respectively. Chapingo variety presented a higher content of Chlorophyll B in the different moisture contents. From the point of view of mucilage production and stability of chlorophyll, the Chapingo variety is the best option under favorable soil moisture conditions, while Narro and H. Escobar varieties are the best option taking a relative water content as indicator of hydric deficit tolerance in suboptimal soil moisture conditions.

**Keywords:** Industrial products, stress physiology, arid zones, succulent plants, drought.

## I/INTRODUCCIÓN

En los ecosistemas, algunos de los impactos de las sequías es la degradación de suelos y reducción de la productividad biológica (Briones, *et al.*, 2018; Miralles, 2021). El cambio climático en el planeta se evidencia con mayor crudeza, convirtiendo las zonas de alta precipitación en zonas más lluviosas, con graves inundaciones y, las zonas de baja precipitación, en áreas más secas con efectos de desertificación, en éstas últimas afectando las diferentes comunidades biológicas, como las vegetales tanto de matorral xerófilo, como de selva baja caducifolia (Troyo, *et al.* 2014).

La productividad agrícola y pecuaria en la mayor parte de las zonas áridas es errática y deficiente, producto de diferentes factores de tipo ambiental y antrópico, pero fuertemente influenciado por la escasez de agua por las sequías recurrentes. En la actualidad la sequía es uno de los problemas que más daños está provocando en los sistemas agro-sociales de México, principalmente en el norte del país (Esparza, 2014).

El nopal (*Opuntia spp*) es un recurso vegetal importante en zonas áridas. Esta planta se considera un almacén natural de agua que hace un uso eficiente de este recurso, con un rendimiento promedio de 20 t ha<sup>-1</sup> mes<sup>-1</sup> de biomasa fresca en condiciones de riego (Flores-Hernández, *et al.* 2017). En algunas regiones, este cultivo suele ser una alternativa forrajera en la ganadería tanto en sistemas de producción intensiva, como de agostadero, donde el agua es el problema principal para la producción de forraje (López, *et al.* 2009). Uno de los factores

que limita el potencial forrajero del nopal es el bajo contenido proteico, que lo hace poco competitivo con cultivos de alto rendimiento nutricional por su contenido de proteína, como la alfalfa. Aunque la diferencia estriba, en que el nopal es altamente eficiente en el uso de agua, en comparación a la alfalfa y esto es lo que hace atractivo al primero en situaciones de escasez de agua, principalmente en sistemas extensivos de agostadero. Ya existen estudios que abordan formas de solventar la deficiencia proteica del nopal, mediante técnicas de enriquecimiento proteico (Flores-Hernández, *et al.* 2017; Flores-Hernández, *et al.* 2019), lo cual podría representar una alternativa de forraje suplementario en la ganadería intensiva.

El nopal no solo ha contribuido a mitigar el problema forrajero en áreas con problemas de escasez y calidad del agua, recientemente está tomando auge la comercialización de mucílago fresco o deshidratado derivado del cladodio. Efectivamente, con base en una serie de características fisicoquímicas, al mucílago del nopal se le atribuyen diferentes beneficios en los sectores alimentario, medicinal e industrial (Torres-Ponce, *et al.* 2015; Inglese, *et al.* 2018) los cuales demandan este producto en el mercado nacional e internacional (Vargas-Rodríguez, *et al.* 2018).

El mucílago del cladodio es una sustancia hidrocoloidal, heteropolisacárida a base de azúcares como arabinosa, galactosa, ramnosa y xilosa y de estructura molecular polielectrolita (Majdoub, *et al.* 2001). Se ha utilizado en el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados y contra coliformes fecales y mal

olor. Se adiciona en pinturas, como adhesivo natural en la cal para la construcción y como impermeabilizante natural en techos (Mora y Vargas, 2015) y como adherente en la elaboración de productos insecticidas (Virgen, 2020).

El objetivo del presente estudio fue caracterizar algunos indicadores químicos y fisiológicos relacionados a la cantidad y calidad del mucílago del cladodio, así como la producción de biomasa fresca en tres variedades de nopal en respuesta a condiciones óptimas y sub-óptimas de humedad del suelo.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

**Ubicación del área de estudio.** El experimento se llevó a cabo en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo, en Bermejillo, Durango, México, ubicada entre los 101° 41' - 104° 61' O y 24° 22' - 26° 23' N, a una altitud media de 1, 100 msnm. El clima es seco desértico, con lluvias en verano y la precipitación pluvial media anual es de 258 mm, la temperatura media anual de 21 °C con máxima de 33.7 °C y mínima 7.5 °C (Medina, *et al.* 2005).

**Diseño experimental y de tratamientos.** El diseño experimental fue en bloques al azar en un arreglo de parcelas divididas con tres repeticiones. Las parcelas grandes fueron tres contenidos de humedad edáfica: óptimo (22-28 %), medio (15-21 %) y sub-óptimo (8-14 %); las parcelas chicas fueron las variedades de nopal Chapingo (CH), Narro (N) y H. Escobar (HE). La unidad experimental fue de 4 hileras de nopal de 8 m de longitud cada una y la parcela útil fueron las dos

hileras centrales, en las que se seleccionaron 4 plantas al azar para medir las respectivas variables.

El área experimental se estableció con plantas de dos cladodios en doble hilera de 0.85 m de ancho entre hileras dentro de cama y 1.7 m entre camas y una distancia de 50 cm entre plantas con arreglo topológico tres bolillos, correspondiente a una densidad de población de 6,667 plantas ha<sup>-1</sup>. Los contenidos de humedad fueron en intervalos con base en las constantes de humedad Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP), las cuales fueron determinadas mediante la curva de abatimiento de humedad del suelo con la técnica de la olla de membrana (Richards, 1948). La capacidad de campo (CC) del suelo fue de 25.5%; en tanto que el punto de marchitez permanente (PMP) fue de 13.1% (Figura 1).

Las constantes de humedad de CC y PMP, fueron el referente para establecer los contenidos de humedad probados en este estudio. El contenido de humedad subóptimo (8-14 %) fue por debajo del PMP, en la perspectiva de generar un estado de estrés hídrico en la planta, ante el carácter de tolerancia al mismo por el mecanismo de evasión al déficit hídrico en sus tejidos (Sifuentes-Rodríguez *et al.*, 2020) y la ruta fotosintética de metabolismo ácido de las crasuláceas, características específicas en este tipo de plantas (CAM, por sus siglas en inglés) ((Niechayev *et al.*, 2019).

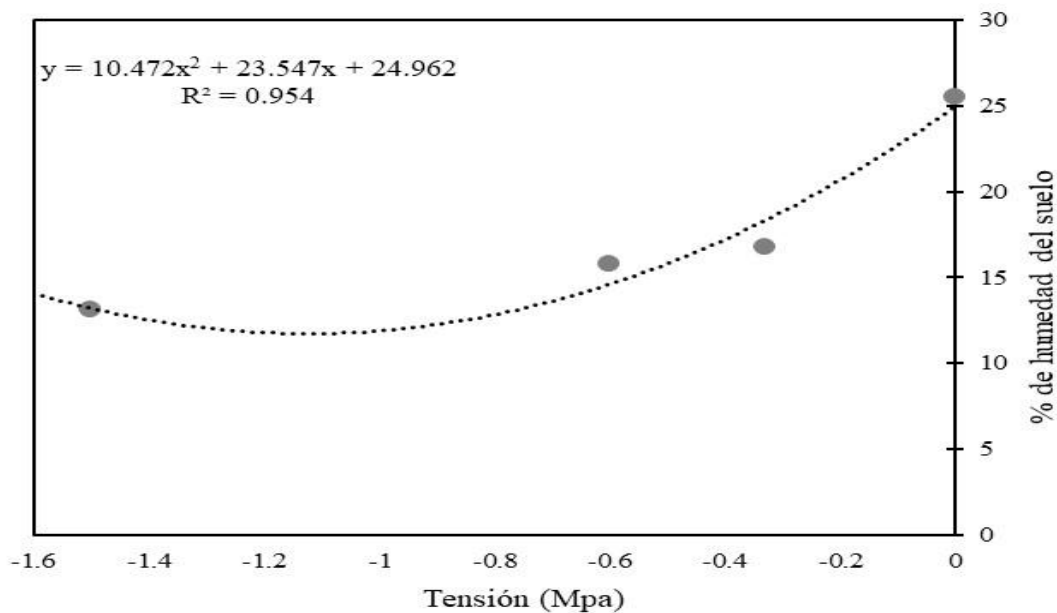


Figura 3. Curva de retención de humedad de suelo del campo experimental. URUZA-UACH. Bermejillo, Durango.

Para el establecimiento de los tratamientos de humedad del suelo (parcela grande), se usó un sistema de riego presurizado a partir de una regadera principal de PVC con conexiones laterales para cada tratamiento, controlando el tiempo de riego mediante llave de paso. Se usó manguera de riego con goteros distantes 0.5 m entre ellos. Para los tratamientos de contenido de humedad, se determinaron diferentes características fisicoquímicas del suelo, tales como: densidad aparente de  $1.2 \text{ g cm}^{-3}$ , capilaridad de  $L = 2.3669T^{0.4215}$  (L en cm y T en min), velocidad de infiltración de  $1.3 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ , evapotranspiración media diaria de 11 mm y coeficiente experimental de evaporación de 70 %. El cálculo del tiempo de riego se hizo conforme al suministro controlado de agua de acuerdo con lo reportado por Jiménez-Galindo & Acosta-gallegos (2013).

Primero se realizó un riego de estandarización hasta alcanzar el contenido óptimo de humedad del suelo (28 %) y posteriormente se diferenciaron los diferentes contenidos de humedad en los intervalos respectivos, procediendo al riego de recuperación cuando cada intervalo de humedad llegó a su límite inferior. El monitoreo de humedad del suelo fue diariamente con uso de medidor digital con lectura en tiempo real (Soil Moisture Meter Mod. MO750, fabricante Extech, Taiwán, China).

**Variables medidas.** Las variables se midieron seis meses después de establecido el experimento, durante la estación de primavera-verano de 2020. Las variables fisicoquímicas del mucílago fueron: producción (mL), pH, contenido de cenizas (%) y sólidos totales (%). Las variables fisiológicas de la planta correspondieron a: contenido de humedad en el tejido, contenido relativo de agua (CRA), contenido de Clorofila A ( $\mu\text{L}$ ), contenido de Clorofila B ( $\mu\text{L}$ ) y pigmentos totales (%).

Para el contenido del mucilago, éste se extrajo mediante la metodología propuesta por Sepúlveda *et al.* (2006), quienes utilizaron cladodios frescos y exentos de cualquier daño físico o microbiológico. Se desinfectaron las piezas por sumersión en solución de hipoclorito de sodio a 100 ppm durante 10 minutos, después se cortaron los nopales en trozos de 1 x 1 cm, a 500 g de nopal en trozos se les agregó una solución de  $\text{CaCl}_2$  al 20% y se dejó reposar por 24 h, mediante un colador y manta de cielo, se separó el mucilago de la materia verde, finalmente se refrigeró a 4 °C.

El contenido de humedad del mucílago se midió con una muestra de 2 g, para lo cual se colocó la muestra en un crisol desecado previamente a una temperatura de 105 °C durante 1 h. Después de colocar las muestras dentro del crisol, éstas se introdujeron dentro de una estufa a 135 °C ± 2 °C durante 2 h. Después de sacar el crisol de la estufa, se introdujo en un desecador hasta que se enfriaron a una temperatura ambiente. El contenido de humedad se obtiene por diferencias de pesos.

El contenido relativo de agua (%) se determinó de acuerdo con la metodología reportada por Kramer (1983), mediante las siguientes ecuaciones:

$$CRA = \frac{\text{Peso fresco} - \text{Peso seco}}{\text{Peso turgente} - \text{Peso seco}} \times 100(\%)$$

$$DH = \frac{\text{Peso turgente} - \text{Peso seco}}{\text{Peso fresco} - \text{Peso seco}} \times 100$$

$CRA = 100 - DH$ . Dónde: CRA: contenido relativo de agua; DH: déficit hídrico.

La determinación del pH se realizó con una muestra de 5 g de material fresco y 30 ml de agua destilada, para lo cual se trituro la muestra en un mortero. Después del triturado se agregó 20 mL de agua destilada para ser tamizado con un papel filtro. A la solución obtenida se le midió el pH con potenciómetro (Marca Conductronic Modelo PH140, Puebla, México), previamente calibrado.

El contenido de cenizas se determinó con 2 g de gel, el cual se colocó en una cápsula de porcelana, para posteriormente se introducida a una mufla por 18 h a 540 °C. Después se agregaron 2 ml de ácido nítrico concentrado y se llevó a

secado en una plancha eléctrica de calentamiento (Thermo Scientific Cimarec Mod. SP131635Q) para evaporar el ácido y aclarar las cenizas. Posteriormente, la muestra se introdujo nuevamente a la mufla por 18 h a 540 °C y se colocó en el desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente. Finalmente se pesó, para determinar el contenido de cenizas, de acuerdo con la metodología establecida por Wang and Strong (1995).

La determinación de sólidos totales se hizo en base a la norma mexicana NMX-F-083-1986 (NMX, 1986), para lo cual se tomaron alícuotas de 10 ml de mucilago que se colocaron en charolas de aluminio previamente secadas y pesadas. Posteriormente se introdujeron en una estufa de secado (marca Binder B) precalentada a 105 °C por 2 h. Finalmente se colocaron las muestras en un desecador por 1 h y se secaron las muestras hasta tener peso constante.

Para la concentración de pigmentos, ésta se realizó en peso fresco (p.f) clorofila A ( $\mu\text{g m}^{-2}$  p.f), clorofila B ( $\mu\text{g m}^{-2}$  p.f), carotenoides ( $\mu\text{g m}^{-2}$  p.f) y pigmentos totales, para lo cual se usó la metodología descrita por Wellburn (1994) medida por espectrometría (Thermo Scientific, Genesys 10S series) y se aplicaron las siguientes ecuaciones:

$$\text{Clorofila A} = \text{Clor A} = (15.56 * (A 666)) - (7.34 * (A 653))$$

$$\text{Clorofila B} = \text{Clor B} = (27.05 * (A 653)) - (11.21 * (A 666))$$

Los pigmentos totales ( $\mu\text{m}^2$  p.f) se calculó mediante la fórmula:

$$\text{Pigmentos totales} = \text{Clorofila A} * \frac{p1}{p2 * 2\pi r^2 * n}$$

Dónde: V1: volumen de extracción; P1: peso en gramos por disco foliar; P2: peso total por disco foliar; N: número de disco-s foliares y r: radio del disco foliar en cm.

**Análisis de datos.** Con la base de datos se realizaron análisis de varianza y prueba de rango múltiple de medias Tukey para identificar el efecto de tratamiento, mediante uso del programa estadístico Minitab 16 y SAS versión 9.0. Para el análisis de regresión se usó el Programa Excel 2016.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Características fisicoquímicas del mucílago de nopal.** El pH del mucílago del cladodio del nopal fue ácido, variando en promedio de 4.47 a 4.86 en las tres variedades y los tres contenidos de humedad del suelo, con una variación significativa en el contenido de humedad óptimo (22-28 %) entre las variedades Narro y Chapingo con un pH menos y más ácido, con valores de 5.02 y 4.76, respectivamente; la variedad HE registró una acidez promedio a las dos primeras. Estos resultados son similares a los reportados por Betancourt-Domínguez, *et al.* (2006) y Aguilar-Sánchez, *et al.* (2007).

El contenido de mucílago, que es la variable de mayor relación respecto al contenido de biomasa fresca en el cladodio de nopal, la variedad CH destacó en los contenidos de humedad óptimo (22-28 %) y medio (15-21 %), en tanto que,

en el contenido sub-óptimo (8-14 %) fue el más bajo, con valores de 800, 712.6 y 552 ml, respectivamente. La variedad N fue de efecto intermedio en el contenido óptimo de humedad y estadísticamente igual a la variedad HE en los otros dos contenidos de humedad edáfica. En determinaciones reportadas por Galicia-Villanueva *et al.* (2017), señalan valores un poco superiores a los reportados en este estudio, con un promedio de 816.39 ml.

El contenido de humedad del mucílago no mostró variación entre variedades en el contenido óptimo de humedad edáfica, pero sí en los otros dos contenidos de humedad, siendo mayor, medio y menor en las variedades Ch, HE y N, con valores de 97.59, 97.47 y 97.53 %, respectivamente. Las variaciones fueron menores, pero significativamente diferentes, seguramente por la baja varianza registrada dentro de tratamiento. Un efecto similar de comportamiento fue observado en la variedad HE en el contenido sub-óptimo de humedad en el suelo (8-14 %), con un valor de 96.98 % (Cuadro 1). Las cantidades de humedad encontradas en esta investigación, son mayores a las reportadas por Maki-Díaz, *et al.* (2015), quienes reportaron un rango de valores entre 94.56 – 94.84 %, en un estudio realizado sobre las características fisicoquímicas del mucílago del nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*). Betancourt-Domínguez, *et al.* (2006) reportaron valores de 91.5 a 94.2 %; Rodríguez-Félix y Cantwell (1988) presentan valores de 92 a 95%, quienes indicaron que la diferencia de humedad en los cladodios se debe principalmente al tamaño de éste.

Un comportamiento similar de no respuesta por los factores de variación antes citados, se encontró en la concentración de sólidos totales, la cual involucra a diferentes compuestos químicos, principalmente polisacáridos de alto y bajo peso molecular. (Cuadro 2). Lo anterior sugiere que la planta de nopal tiene una amplia tolerancia a las condiciones deficientes de humedad en el suelo, o bien, que el contenido más bajo de humedad del suelo (8-14 %) no fue suficiente para inducir un estado de estrés hídrico, por lo que no se afectó el contenido de compuestos orgánicos contenidos en la concentración de sólidos totales. Estos resultados no coinciden con lo reportado por diferentes autores (Sánchez-Blanco, *et al.* 1989; González-Altozano y Castell, 2000; Verreynne, *et al.*, 2001), quienes reportaron mayor concentración de diferentes metabolitos en respuesta de las plantas de diferentes especies a condiciones de estrés ambiental.

Cuadro 4. Efecto del contenido de humedad del suelo en la acidez, contenido de humedad y contenido de cenizas del mucilago en tres variedades de nopal (*Opuntia spp*). Bermejillo, Durango. Primavera – verano, 2020.

VARIEDAD NOPAL	CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SUELO (%)								
	MUY FAVORABLE (22 – 28%)			FAVORABLE (15– 21%)			DESFAVORABLE (8 – 14%)		
	pH	CHM (%)	CM (ml)	pH	CHM (%)	CM (ml)	pH	CHM (%)	CM (ml)
<b>Chapingo</b>	4.76 b	98.2 a	800.0 a	4.55 a	97.59 a	712.6 a	4.45 a	97.13 a	552.3 b
<b>Escobar</b>	4.81 ab	98.2 a	789.3 c	4.57 a	97.49 c	701.3 b	4.49 a	96.98 b	571.0 a
<b>Narro</b>	5.02 a	98.2 a	795.6 b	4.57 a	97.53 b	706.0 b	4.48 a	97.06 ab	573.3 a
<b>Promedio</b>	<b>4.86</b>	<b>98.2</b>	<b>795.0</b>	<b>4.56</b>	<b>97.54</b>	<b>706.66</b>	<b>4.47</b>	<b>97.05</b>	<b>565.55</b>

Prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Cifras con la misma letra dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. pH= Grado de acidez del mucílago CHM= Contenido de humedad del mucílago CM= Contenido de mucílago.

**Calidad del mucílago de la penca de nopal.** El contenido de cenizas, que se relaciona a la concentración de micronutrientes en el mucílago (Cabrera *et al.*, 2012), no mostró ninguna variación por efecto de la humedad del suelo, ni por variedad. Lo anterior sugiere que el contenido nutrimental no es sensible a la disponibilidad de micronutrientes en ninguna de las tres variedades de nopal evaluadas en este estudio.

Cuadro 5. Efecto del contenido de humedad del suelo en la cantidad y calidad del mucilago en tres variedades de nopal (*Opuntia* spp). Bermejillo, Durango. Primavera-verano, 2020.

VARIEDAD NOPAL	CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO					
	MUY FAVORABLE (22 – 27 %)		CONTENIDO FAVORABLE (16-21%)		DESFAVORABLE (10 – 15%)	
	CC	ST	CC	ST	CC	ST
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
<b>Chapingo</b>	2.44 a	6.00 a	2.56 a	6.00 a	4.14 a	6.00 a
<b>Escobar</b>	2.42 a	6.33 a	2.52 a	6.00 a	4.11 a	6.00 a
<b>Narro</b>	2.36 a	5.66 a	2.51 a	6.00 a	4.08 a	6.00 a
<b>Medía</b>	<b>2.41</b>	<b>6.00</b>	<b>2.53</b>	<b>6.11</b>	<b>4.11</b>	<b>6.00</b>

Prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. Contenido de cenizas ST= Sólidos totales

**Características fisiológicas de la planta del nopal.** Gran parte de las características fisicoquímicas y de calidad del gel, depende de las características fisiológicas de la planta. El contenido relativo de agua es el termino más utilizado para calcular la cantidad de agua en un tejido. La disposición de agua en el tejido es el reflejo del total del agua que éste puede almacenar y su concentración porcentual permite establecer el estado hídrico de la planta (Acevedo, 2003). La variedad HE presentó el mayor contenido relativo de agua en los niveles óptimo, medio y sub-óptimo de humedad en el suelo, con valores de 82.56, 78.54 y 67.24 %, respectivamente; en tanto que la variedad N, tuvo un comportamiento intermedio entre las variedades CH y HE. La variedad CH fue la de menor concentración de agua en el contenido sub-óptimo de humedad edáfica, pero se recuperó en dicha variable en el contenido óptimo, igualando a la respuesta de la HE (Figura 2). Lo anterior sugiere que la variedad CH, baja considerablemente su contenido de humedad en condiciones de déficit hídrico, pero se recupera ampliamente en condiciones óptimas de humedad, lo cual es importante en términos de sobrevivencia y productividad, respectivamente.

Ponce-Bautista (2012) reporta datos similares a los encontrados en los niveles favorables de humedad en cactáceas y agaves, con contenidos de 97.74 100 %, respectivamente, bajo condiciones de riego y de 65.3 y 55.3%, respectivamente, bajo condiciones de temporal. Pimienta-Barrientos *et al.* (2012) presentan datos equivalentes a los encontrados en el presente estudio de déficit hídrico, donde se observan valores en temporada húmeda de entre 82 - 87% de contenido relativo de agua aproximadamente y en temporada seca con valores entre 60 - 82%.

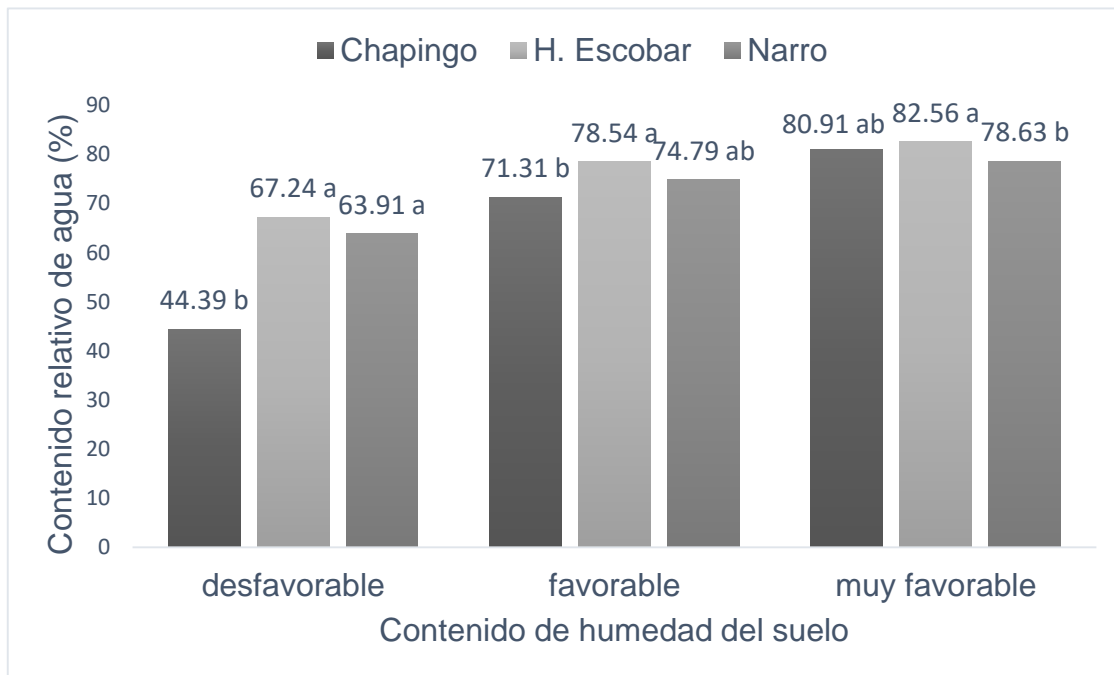


Figura 4. Contenido relativo de agua (CRA) en el mucílago de tres variedades de nopal (*Opuntia* spp), bajo diferentes contenidos de humedad del suelo. Bermejillo, Durango, México. Prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Cifras con la misma letra dentro de un mismo régimen de humedad del suelo, son estadísticamente iguales.

Respecto a los pigmentos representados por las clorofilas A y B y los pigmentos totales, están directamente relacionados con la actividad fotosintética, la cual es el principal proceso fisiológico para la conversión de los compuestos minerales a compuestos orgánicos requeridos para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Calatayud y Barreno, 2004). Los pigmentos fotosintéticos son importantes para las plantas principalmente para la recepción de luz y producción de energía para el proceso reductor como ATP y NADPH (Masoudi-Sadaghiani, *et al.* 2011). En el

presente estudio un efecto en la concentración de estas variables sólo fue detectada en el contenido favorable de humedad del suelo (15-21 %), donde la variedad N, fue la de mayores valores en Clorofila A y Pigmentos totales, con valores de 10.36 % y 2037.6 mg m<sup>-2</sup>, respectivamente; en tanto que la variedad CH, fue mayor en contenido de Clorofila B, el cual fue menor en las variedades HEr y N, sin diferencia estadística entre ellas. Los contenidos de humedad óptimo (22-28 %) y subóptimo (8-14 %), no mostraron efecto para ninguna de las tres variables antes citadas (Cuadro 3). Lo anterior sugiere que en realidad la pigmentación es poco alterada en las tres variedades por efecto del contenido de humedad probados en este estudio. Aguilar-Becerril & Peña-Valdivia (2006) presentaron valores de 5.4, 11.2, 8.2% en clorofila A y 4.6, 6.7, 6.9% en clorofila B en nopal bajo condiciones de déficit hídrico severo, déficit intermedio y sin déficit, respectivamente.

## **CONCLUSIONES**

La variedad Chapingo fue la de mayor contenido de mucílago fresco bajo condiciones media y óptimas de humedad del suelo; pero es la más afectada al pasar a condiciones sub-óptimas de humedad, con el más bajo rendimiento en esta variable. En condiciones de déficit hídrico las variables de mejor respuesta fueron la H. Escobar y la Narro, en respuesta a una mayor tolerancia al estrés hídrico. El contenido de humedad del suelo no afectó la calidad del mucílago en términos de contenido de cenizas y sólidos totales, con un comportamiento similar entre variedades independientemente del contenido de humedad edáfica. Finalmente, el contenido de clorofila A y B y pigmentos totales es poco sensible a los contenidos

de humedad del suelo entre variedades, con moderado efecto de concentración de estos pigmentos en la variedad Narro ante condiciones de déficit hídrico.

Cuadro 6. Contenido de clorofila A y B y pigmentos totales en tres variedades de nopal (*Opuntia spp*) en diferentes contenidos de humedad del suelo. Bermejillo, Durango. Primavera-verano, 2020.

Variedad	Contenido de humedad en el suelo (%)								
	Muy Favorable (22 - 28)			Favorable (15 - 21)			Desfavorable (8 - 14)		
	CIA ( $\mu\text{L}^{-1}$ )	CIB ( $\mu\text{L}^{-1}$ )	Pt ( $\mu\text{g}/\text{m}^{-2}$ )	CIA ( $\mu\text{L}^{-1}$ )	CIB ( $\mu\text{L}^{-1}$ )	Pt ( $\mu\text{g}/\text{m}^{-2}$ )	CIA ( $\mu\text{L}^{-1}$ )	CIB ( $\mu\text{L}^{-1}$ )	Pt ( $\mu\text{g}/\text{m}^{-2}$ )
Chapingo	9.44 a	5.34 a	1856.7 a	10.2 ab	5.87 a	2012.4 ab	5.31 a	4.80 a	1045.0 a
Escobar	9.34 a	4.69 a	1835.7 a	10.13 b	4.72 b	1991.4 b	5.20 a	4.44 a	1023.1 a
Narro	9.52 a	5.02 a	1871.1 a	10.36 a	4.74 b	2037.5 a	5.27 a	4.40 a	1036.9 a
<b>Promedio</b>	<b>9.43</b>	<b>5.02</b>	<b>1854.53</b>	<b>10.24</b>	<b>5.11</b>	<b>2013.80</b>	<b>5.26</b>	<b>4.55</b>	<b>1035.05</b>

Prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Cifras con la misma letra dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. CIA= Clorofila A; CIB= Clorofila B; Pt= Pigmentos totales.

## LITERATURA CITADA

- Acevedo, E. (2003). Resistance to abiotic stresses. In: Plant Breeding: Principles and Prospect. London: Chapman & Hall, p. 406-418.
- Aguilar-Sánchez, L.; M.T. Martínez-Damián, A.F. Barrientos-Priego, N. Aguilar-Gallegos y C. Gallegos-Vásquez. 2007. Potencial de oscurecimiento enzimático de variedades de nopalitos. Journal of the Professional Association for Cactus Development, 9:165-184.
- Briones, O., Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Pavón, N. & Perroni, Y. (2018). Biomasa y productividad en las zonas áridas mexicanas. *Madera y bosques*, 24(spe), e2401898. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401898>
- Betancourt-Domínguez, M.A., T. Hernández-Pérez, P. García-Saucedo, A. Cruz-Hernández, and O. Paredes-López. 2006. Physico-chemical changes in cladodes (nopalitos) from cultivated and wild cacti (*Opuntia* spp.). Plant Foods for Human Nutrition, 61:115-119.
- Cabrera, S. H. R., Morón, R. F. J., Victoria, A. Ma. Del C., García H. A. I., Acosta, L. De la L. (2012). Composición fitoquímica de partes aéreas frescas de *Phania matricarioides*. Revista Cubana de Plantas Medicinales 17(3):268-278.
- Calatayud A, Barreno E. (2004) Response to ozone in two lettuce varieties on chlorophyll a fluorescence, photosynthetic pigments and lipid peroxidation. Plant Physiology and Biochemistry 42: 549-555.

- Esparza, Miguel. (2014). La sequía y la escasez de agua en México: Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia*, (89): 193-219.
- Flores-Hernández A, Macías, R, F. J., Esparza-Ibarra, E. L, Quiñones-Zaldivar A, Murillo-Amador, M., García- Hernández, J. y Rueda-Puente, E. O. (2019) Evaluación del nopal forrajero (*Opuntia* spp) en el Norte de México como opción para su enriquecimiento proteico. *Sociedad Mexicana de Agricultura Sostenible, A.C.* pp. 1474-1489. <https://www.somas.org.mx> › 2019/01 › 5-AGROTECNIA .
- Flores-Hernández, A., Araújo - Filho, J. T., Gomes da Silva, F., Ramírez-Ordoñez, S. Murillo - Amador, B. (2017). Dietas a base de forraje tradicional y nopal (*Opuntia* spp.) enriquecido con proteínas para alimentar cabras *Nova Scientia*. 9(8): 149-166.
- Galicia-Villanueva, S., Escamilla-García, P. E., Alvarado-Raya, H., Aquino-González, L. V., Serna-Álvarez, H., & Hernández-Cruz, L. M. (2017). Plantación experimental de nopal para evaluación de sistemas de fertilización y extracción de mucílago. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(5): 1087-1099.
- González-Altozano, P., Castel, J. L. (2000). Effects of regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees growth, yield and fruit quality. *Acta Horticulturae*. 537:749–58. doi:10.17660/ ActaHortic.2000.537.89.

- Inglese, P., Mondragon, C., Nefzaoui, A., Saenz, C., Taguchi, M., Makkar, H. y Louhaichi, M. (2018). Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.11766/9380>
- Jiménez-Galindo, J. C y Acosta-Gallegos, J. A. (2013). Rendimiento de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) y Tépari (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) bajo el método riego-sequía en Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4: 557-567.
- Kramer, P. J. Water relation of plants. (1983). New York Academic Press, 475 p.
- López R. M., Solís, G. G., Murrieta, S. J. & López, E. R. (2009). Percepción de los ganaderos respecto a la sequía: viabilidad de un manejo de los agostaderos que prevenga sus efectos negativos. *Estudios sociales (Hermosillo, Son.)*, 17(spe): 221-241.
- Majdoub, H., Sadok, R., & Deratani, A. (2001). Polysaccharides from prickly pear peel and nopals of *Opuntia ficus indica*: extraction, characterization, and polyelectrolyte behavior. *Polymer International*, 50(5): 552-560.
- Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M. L., Calderón-Zavala, G., & Anaya-Rosales, S. (2015). Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia*, 49(1): 31-51.

Masoudi-Sadaghiani F, Babak AM, Zardoshti MR, Hassan RSM, Tavakoli A (2011) Response of proline, soluble sugars, photosynthetic pigments, and antioxidant enzymes in potato (*Solanum tuberosum* L.) to different irrigation regimes in greenhouse condition. Australian Journal of Crop Science 5: 55-60.

Medina, G. G., Diaz, P. G. López, H. J, Ruíz, C. J. A, y Marín, S. M. (2005). Estadísticas climatológicas básicas del estado de Durango. (Periodo 1961 – 2003). Libro Técnico № 1. Campo Experimental Valle del Guadiana. CIRNOC-INIFAP. 224 p.

Miralles, C. I., Trasar-Cepeda R., Soria, R. Ortega M. Lucas-Borja, E. (2021). Environmental and ecological factors influencing soil functionality of biologically crusted soils by different lichen species in drylands. Science of the Total Environment 794 (2021) 1484913. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148491>

Mora, G. X. y Vargas, R. L. 2015. Paredes blancas, una alternativa digna: pintura natural base cal y nopal. 20° Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México. Cuernavaca, Morelos del 17 al 20 de noviembre de 2015. AMECIDER – CRIM, UNAM. Recuperado de: <https://www.semanticscholar.org/paper/Paredes-blanca>.

- Niechayev, N. A., Pereira, P. N., & Cushman, J. C. (2019). Understanding trait diversity associated with crassulacean acid metabolism (CAM). *Current Opinion in Plant Biology*, 49, 74–85.
- NMX (1986). NMX-F-083-1986. Alimentos – Determinación de humedad en productos alimenticios. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. 6 p. Recuperado de: [https://caisatech.net/uploads/XXI\\_2\\_MXD\\_C10\\_NMX-F-083-1986\\_R0\\_14JUL1986.pdf](https://caisatech.net/uploads/XXI_2_MXD_C10_NMX-F-083-1986_R0_14JUL1986.pdf).
- Pimienta-Barrios, E., Zañudo-Hernández, J., Muñoz-Urias, A., & Robles-Murguía, C. (2012). Eco fisiología de tallos jóvenes (cladodios) de *Opuntia ficus-indica* en condiciones húmeda y seca. *Gayana. Botánica*, 69(2): 232-239.
- Richard, L. A. (1948). Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science*, 66:105-110.
- Rodríguez-Félix, A., and M. Cantwell. (1988). Developmental changes in composition and quality of prickly pear cactus cladodes (nopalitos). *Plant Food Hum. Nutr.* 38: 83-93.
- Sánchez-Blanco M. J, Torrecillas A, León A, del Amor F. (1989). The effect of different irrigation treatments on yield and quality of Verna lemon. *Plant and Soil* 120(2): 299–302.
- Sepúlveda, E., Saenz, C. Aliaga, E. and Aceituno, C. (2006). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia spp.* Dto. de Agroindustria y

Enología, Facultad de Ciencias Agrómicas, Universidad de Chile. Santiago Chile. 145 p.

Sifuentes-Rodríguez, N. S., Pedroza-Sandoval, A. Zegbe, Jorge A., & Trejo-Calzada, R. (2020). Indicadores de productividad y calidad de gel de sábila en condiciones de estrés salino. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 43(2): 181-187.

Torres-Ponce, R. L, Morales-Corral, D.; Ballinas-Casarrubias, Ma. de L., Nevárez-Moorillón, G. V. (2015). El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5):1129- 1142.

Troyo, D. E., Mercado, M., G., Cruz, F., A., Nieto, G., A., Valdez, C. R. D., García, H., J. L., & Murillo, A., B. (2014). Análisis de la sequía y desertificación mediante índices de aridez y estimación de la brecha hídrica en Baja California Sur, noroeste de México. *Investigaciones geográficas*. (85): 66-81. <https://doi.org/10.14350/rig.32404>.

Vargas-Rodríguez, L, Arroyo, F. G., Herrera, M. C. H., Pérez Nieto, A., García V. M. I., Rodríguez Núñez, J. R. (2016). Propiedades físicas del mucílago de nopal *Acta Universitaria*, 26(1): 8-11

Verreyne, J. S., Rabe, E., Theron, K. I. (2001) The effect of combined deficit irrigation and summer trunk girdling on the internal fruit quality of 'Marisol' Clementines. *Scientia Horticulturae*. 91(1–2):25–37.

Virgen, S. C. 2020. Evaluación de la acción adherente del mucílago de nopal *Opuntia ficus-indica* como coadyuvante en el uso de insecticidas agrícolas. Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología Ambiental. Facultad de Química. Universidad Autónoma de Querétaro. 86 p. Recuperado de: <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/1791>

Wang Y. and K. Strong (1995) A two year study monitoring several physical and chemical properties of field grown *Aloe barbadensis* Miller leaves. Subtropical Plant Science 47:34-38.

Wellburn, R. A. (1994). The Spectral Determination of Chlorophylls *a* and *b*, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. Journal of Plant Physiology, 144(3): 307-313.