

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA**



Evaluación del impacto del estrés hídrico en el índice de vegetación de diferencia normalizada en el nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*)

Por:

**CARLOS DANIEL LÓPEZ SANTIAGO**

TESIS

**Presentada como requisito parcial para**

**obtener el título de:**

**INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Evaluación del impacto del estrés hídrico en el índice de vegetación de  
diferencia normalizada en el nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*)

Por:

**CARLOS DANIEL LÓPEZ SANTIAGO**

TESIS

Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador como  
requisito para obtener el título de:

**INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA**

Aprobada por el comité de Asesoría:

---

Dr. Jesús Rodolfo Valenzuela García  
Asesor Principal

---

Dr. Alain Buendía García  
Asesor Externo

---

Dra. Blanca Elizabeth de la Peña Casas  
Coasesor

---

MC. Juan Antonio López López  
Coasesor

---

MC. Sergio Sánchez Martínez  
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México. Junio de 2025

## DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (autoplagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo el autor tiene conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor. Por lo anterior el autor se responsabiliza de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organizacional, medio público o privado.

Autor principal

Asesor principal

---

Nombre y firma

---

Nombre y firma

## AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Terra Mater la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN)** por darme un lugar en donde estudiar una carrera profesional y en especial al departamento de **Ingeniería Mecánica Agrícola (IMA)** que me vio desarrollarme durante todos estos años.

Al programa de **Becas para el Bienestar Benito Juárez** por otorgarme una beca durante toda la carrera al igual que el programa de **Beca Académica** de esta institución puesto que igual fui beneficiario.

A todos los **Ingenieros y Doctores** que me regalaron una parte de su tiempo y le dieron seguimiento a mi desarrollo profesional a lo largo de estos años a través de clases y prácticas.

A mi asesor de Tesis: **Dr. Jesús Rodolfo Valenzuela García** que me acepto dentro de su proyecto de investigación y darme esa oportunidad de participar en este valioso trabajo.

A mi Tutora de carrera: **Dra. Blanca Elizabeth de la Peña Casas** quien llevó un seguimiento de mis materias y me orientaba a seguir avanzando.

A todos mis **amigos** que me acompañaron durante este camino, que a pesar de las diversas situaciones que vivimos jamás nos dimos por vencidos.

**A todos y cada una de las personas** que me regalaron su valioso tiempo durante todos estos años, permitiéndome llegar a donde estoy.

## DEDICATORIA

### A mis Padres

Dedico esta tesis a mis padres: Bardomiano López Espinosa y Aurelia Santiago Herrera, por ser mi fortaleza y mi mayor inspiración, por darme su amor incondicional, su apoyo en cada paso de mi camino y por enseñarme que con esfuerzo y perseverancia todo es posible. Esta tesis es tanto mía como suya, porque sin ustedes este sueño no habría sido posible, con amor y gratitud este logro se los dedico.

### A mis Hermanos

A mi hermano Uriel Bersain López Santiago y hermana Ángeles Noemi López Santiago, con quienes he compartido risas, aventuras y sueños, que cada paso de este camino; su compañía me ha dado fuerzas a pesar de todos los momentos difíciles que hemos pasado, su compañía me ha dado consuelo y me han impulsado a seguir adelante, sobre todo a no rendirme, agradezco a los dos por estar siempre ahí, por ser mi familia y mi hogar. Este logro también les pertenece, porque sin ustedes, este viaje no habría sido el mismo.

### A mi amada futura esposa

Ángela Castro Guizasola Castro, mi amor y compañera de vida, gracias por estar a mi lado en cada paso de este camino, por darme ánimos en los momentos difíciles y celebrar conmigo cada pequeño avance. Tu amor ha sido mi motor, tu apoyo mi fortaleza y tu compañía el regalo más hermoso en este camino, esta meta alcanzada es tan tuya como mía, por no dejarme solo y demostrarme que los sueños también se cumplen.

## TABLA DE CONTENIDO

HOJA DE FIRMAS .....	i
DECLARACIÓN DE NO PLAGIO.....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
DEDICATORIA.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
CAPÍTULO I: MARCO INTRODUCTORIO.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. Objetivo general.....	2
1.3. Objetivo específico.....	2
1.4. Hipótesis .....	2
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. El Nopal (Opuntia Ficus-Indica).....	3
2.2. Taxonomía y nomenclatura.....	4
2.3. Morfología del nopal Opuntia Ficus Indica.....	5
2.3.1. Raíz .....	6
2.3.2. Tallo .....	7
2.3.3. Hojas .....	7
2.3.4. Flor .....	8
2.3.5. Fruto .....	9
2.4. Producción del nopal a nivel nacional e internacional.....	9
2.5. Distribución geográfica .....	11
2.6. Norma oficial mexicana de tamaños del nopal .....	11

2.7.	Uso y beneficios del nopal verdura .....	13
2.7.1.	Uso del nopal en la alimentación .....	14
2.7.2.	Uso del nopal en cosmetología.....	14
2.7.3.	Uso del nopal en medicina .....	14
2.8.	Espectro electromagnético .....	15
2.8.1.	Banda espectral.....	16
2.8.2.	Espectro visible.....	16
2.9.	Índices de vegetación .....	16
2.10.	Índice de vegetación de diferencia normalizada .....	17
2.10.1.	Como funciona .....	18
2.10.2.	Cálculo .....	19
2.10.3.	Interpretación de valores.....	19
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS.....		21
3.1.	Información y localización del área experimental .....	21
3.2.	Materiales .....	22
3.2.1.	Herramientas para acondicionamiento del terreno .....	22
3.2.2.	Materiales para la instalación del sistema de riego .....	22
3.2.3.	GreenSeeker Handheld Crop Sensor .....	23
3.2.4.	FieldScout TDR 300 .....	24
3.3.	Metodología .....	24
3.3.1.	Extracción del nopal .....	25
3.3.2.	Preparación del terreno .....	26
3.3.3.	Plantación.....	27
3.3.4.	Instalación de sistema de riego .....	27
3.3.5.	Limitación y etiquetado de tratamientos .....	29

3.3.6. Riego .....	30
3.3.7. Medición .....	31
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	32
4.1. Comparación de medias para el NDVI.....	33
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	34
BIBLIOGRAFÍAS .....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Raíz del nopal (Dreamstime, s.f.).....	6
<b>Figura 2.</b> Tallo de nopal (Arqueología Mexicana, 2009) .....	7
<b>Figura 3.</b> Hoja de nopal (Hydroenvironment, 2016).....	8
<b>Figura 4.</b> Flor de nopal (Arqueología Mexicana, 2009) .....	8
<b>Figura 5.</b> Fruto de nopal (Arqueología Mexicana, 2009) .....	9
<b>Figura 6.</b> Gráfico realizado con datos obtenidos de la página de Altépetl (Altépetl, 2024).....	10
<b>Figura 7.</b> Las propiedades del espectro electromagnético (Cesar's Booklet).....	15
<b>Figura 8.</b> Como funciona el NDVI (EOS DATA ANALYTICS, 2024).....	18
<b>Figura 9.</b> Interpretación de valores NDVI (EOS DATA ANALYTICS, 2024) .....	20
<b>Figura 10.</b> Lugar donde se llevó a cabo el experimento .....	21
<b>Figura 11.</b> GreenSeeker Handheld Crop Sensor (PTx Trimble, s.f.).....	23
<b>Figura 12.</b> FieldScout TDR 300 (Spectrum Technologies, Inc.).....	24
<b>Figura 13.</b> Extracción de las pencas de nopal.....	26
<b>Figura 14.</b> Campo de Nopales.....	26
<b>Figura 15.</b> Maquinaria con rastra.....	26
<b>Figura 16.</b> Maquinaria con subsolador .....	26
<b>Figura 17.</b> Plantación de pencas .....	27
<b>Figura 18.</b> Propuesta de sistema de riego.....	28
<b>Figura 19.</b> Instalación de tuberías .....	29
<b>Figura 20.</b> Instalación de cintillas .....	29
<b>Figura 21.</b> Etiquetado de tratamientos. ....	30
<b>Figura 22.</b> Medición a 90°.....	31
<b>Figura 23.</b> Medición a 45°.....	31

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Taxonomía y nomenclatura del nopal .....	5
Tabla 2. Componentes de la calidad de nopal verdura incluidos en la norma mexicana NMX-FF-068-SCFI-2006 y la norma internacional Codex Stan 185-1993. ....	12
Tabla 3. Aporte nutrimental del nopal .....	13
Tabla 4. Tiempo de regado.....	30
Tabla 5. Análisis de varianza (ANOVA) para NDVI.....	32
Tabla 6. Comparación de medias.....	33

# **CAPÍTULO I: MARCO INTRODUCTORIO**

## **1.1. INTRODUCCIÓN**

El cultivo de nopal (*Opuntia* spp.) representa una de las principales especies de importancia agrícola en zonas áridas y semiáridas, debido a su alta resistencia a condiciones de sequía y calor. Por otra parte, sus diferentes usos pueden variar, por ejemplo, su uso en la gastronomía mexicana con su amplia variedad de platillos que se pueden crear; en la medicina tradicional debido a que hay estudios en las que se demuestran sus propiedades curativas; en cosmética gracias a sus propiedades hidratantes, regenerativas y antioxidantes; también se le hace uso en el forraje para ganado en zonas desérticas.

Por lo tanto, el manejo adecuado del riego puede mejorar significativamente su desarrollo y productividad. En este contexto, el uso de tecnologías de monitoreo remoto, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), ha cobrado relevancia como una herramienta no invasiva para evaluar el estado vegetativo del cultivo en diferentes condiciones hídricas.

El NDVI permite detectar variaciones en la salud y vigor de las plantas mediante el análisis de la reflectancia de la vegetación en bandas del espectro visible e infrarrojo cercano. En este estudio, se evaluó el comportamiento fisiológico del nopal bajo tres tratamientos de estrés hídrico, diferenciados por el tiempo de riego aplicado. Las pruebas consistieron en asignar diferentes frecuencias o tiempos de riego a cada tratamiento, con el objetivo de determinar cómo afectan estos manejos al desarrollo

del cultivo, medido mediante valores de NDVI, la cual fue medida semanalmente con la sonda GreenSeeker Handheld Crop Sensor de manera paralela al cultivo a un ángulo de 90° y 45°.

El NDVI se ha utilizado ampliamente en diversos estudios, incluyendo la evaluación de nitrógeno en el cultivo de arroz (Ali *et al.*, 2020), así como para el monitoreo y la evaluación del desarrollo de los cultivos mediante el GreenSeeker™ (Gaytán Martínez *et al.*, 2021).

Esta metodología nos permitió una comparación objetiva del efecto del riego en la vitalidad del nopal, proporcionando información valiosa para optimizar el uso del recurso hídrico en sistemas agrícolas sostenibles.

## **1.2. Objetivo general**

Evaluar el estrés hídrico del nopal verdura utilizando el NDVI.

## **1.3. Objetivo específico**

- Evaluar del estrés hídrico del nopal verdura utilizando el NDVI.
- Evaluación del estrés hídrico del nopal verdura utilizando el NDVI A 45° Y 90°.

## **1.4. Hipótesis**

Hipótesis Investigación

- El estrés hídrico tiene un efecto significativo en el NDVI del nopal verdura.

Hipótesis Nula

- El estrés hídrico no tiene un efecto significativo en el NDVI del nopal verdura.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. El Nopal (*Opuntia Ficus-Indica*)

De acuerdo con la página de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, los nopales son el género con mayor distribución de la familia de las cactáceas, la cual fue nombrada primeramente por Carlos Linneo en el año de 1753 como **Cactus opuntia**. Tiempo después, Philip Miller corrigió el nombre a **Opuntia ficus-indica**. Actualmente “hoy se reconocen cerca de 220 especies y en México existen entre 60 y 90 de estas especies” (CONABIO, 2023).

El nopal es una planta endémica de México que pertenece a la familia de la cactáceas, comúnmente conocido como palera, penca, tunera y chumbera, entre otros nombres más, aunque su nombre científico es *Opuntia ficus-indica*. Su uso se remonta al periodo prehispánico y va desde el uso gastronómico hasta la medicinal (México desconocido, s.f.).

Esta cactácea se encuentra presente en zonas áridas y semiáridas, tiene una diversidad de especies y así mismo una amplia distribución geográfica de esta cactácea en todo México, además por su composición nutrimental se considera un buen producto alimenticio y una buena opción de forraje en zonas desérticas por su alta resistencia a la sequía, por otra parte, sus propiedades medicinales hace que sea bueno para la control de la diabetes, como antioxidante, anticancerígeno, antiviral y como antiolesterolémico, lo que hace que sea utilizado en la medicina tradicional (Torres Ponce, Morales Corral, Ballinas Casarrubias, & Nevárez Moorillón, 2015).

En el artículo escrito por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) señala que La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha catalogado al nopal como una planta capaz de crecer en tierras donde otros cultivos no prosperan, debido a sus características únicas, puesto que es capaz de adaptarse a las condiciones limitantes generadas por sequías prolongadas e incluso al fenómeno de desertificación (SEMARNAT, 2020).

## **2.2. Taxonomía y nomenclatura**

La taxonomía tiene la función de reconocer y agrupar las plantas en distintas categorías basándose en su relación biológica y en el número de características que tienen en común, por lo tanto, la nomenclatura se ocupa de asignarles un nombre (Ungemach & Saburido, 2016).

De acuerdo con un artículo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2007), señala que "La taxonomía de las cactáceas es complicada, ya que la mayoría de los sistemas de clasificación generan confusiones y contienen una enorme sinonimia, de acuerdo con esto, los taxónomos de las cactáceas en sus trabajos prácticos siguen ordenándolas según la taxonomía clásica que tiene como base la morfología" (Tabla 1) (p18).

**Tabla 1. Taxonomía y nomenclatura del nopal**

<b>Taxonomía</b>	<b>Nomenclatura</b>
Reino	Vegetal
Subreino	Embryophyta
División	Angiospermae
Clase	Dicotyledoneae
Subclase	Dialipétalas
Orden	Opuntiales
Familia	Cactaceae
Tribu	Opuntiae
Subfamilia	Opuntioideae
Género	Opuntia
Subgénero	Platyopuntia
Especie	Varios nombres

Fuente: Características principales del cultivo de nopal en el Distrito Federal Caso Milpa Alta (INEGI, 2007).

### **2.3. Morfología del nopal *Opuntia Ficus Indica***

Como lo redacta (Hernández Gómez, 2017), el nopal a través de los años ha evolucionado y desarrollado características morfológicas para enfrentar a la escasez de agua, a las variaciones de temperaturas extremas y sobre todo a las diversas condiciones de las zonas áridas y semi áridas del país, a pesar de que algunas especies han colonizado ambientes con mayor agua disponible.

La succulencia es la principal característica morfológica de los nopales y de la mayoría de las cactáceas y esta se manifiesta de diversas formas: en un nivel morfológico por sus gruesos cladodios y en el nivel anatómico por sus diversas capas de células almacenadoras de agua (CONABIO, 2023).

Este fenómeno facilita a los órganos de estas plantas la acumulación rápida de grandes volúmenes de agua durante los cortos periodos de humedad y, por otra parte, las formas esféricas o suculentas son los cuerpos más eficaces para prevenir la evapotranspiración (Hernández Gómez, 2017, p.18).

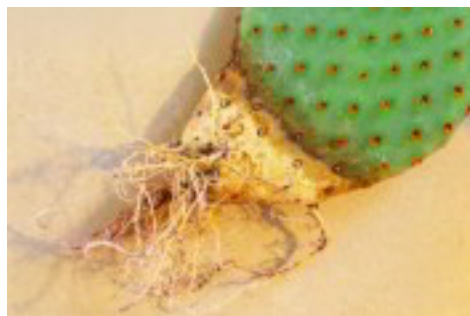
Continuación se redacta en forma breve algunas de las características morfológicas de diferentes autores:

### **2.3.1. Raíz**

Las raíces de los nopales son pivotantes, esto quiere decir que tiene una raíz central de la cual se desprenden más raíces, llamadas secundarias.

Sus raíces suelen ser gruesas y sus dimensiones aumentan en relación proporcional al crecimiento de la parte superior de la planta, por lo general, están cubiertas de pelos absorbentes cuando hay suficiente humedad, en caso contrario estos pelos o raicillas desaparecen, al igual que dependiendo de las condiciones del suelo estas raíces se desarrollan de forma radial (Figura 1).

Dependiendo de la especie del nopal y condiciones del suelo en la que crece, las raíces de la planta pueden llegar a crecer hasta 8 metros de largo (Barros & Buenrostro, 1998, p.55).



**Figura 1.** Raíz del nopal (Dreamstime, s.f.)

### 2.3.2. Tallo

El tallo es suculento, erecto y ramificado (Figura 2), la cual se origina de cladodios que primeramente tienen forma aplanada y con el tiempo los más inferiores adquieren consistencia leñosa y adoptan una forma cilíndrica, de igual forma esta posee una cutícula gruesa que ayuda almacenar agua en sus tejidos. La principal función del tallo es servir de estructura a la planta y de realizar la fotosíntesis (Rosales Cervantes , 2010).



**Figura 2.** Tallo de nopal (Arqueología Mexicana, 2009)

### 2.3.3. Hojas

En el nopal, solo se encuentran en los renuevos de pencas (cladodios) cuando se encuentran en su fase de tierno. Son hojitas de forma cilíndrica y caduca, con forma de cuernitos (Figura 3); herbáceas, donde en sus axilas se encuentran las areolas de las que emergen las espinas. Las hojas se extinguen totalmente al llegar la penca a un cierto nivel de desarrollo, es decir, en pocos días, y en su lugar se mantienen las espinas (Hernández Gómez, 2017).



**Figura 3.** Hoja de nopal (Hydroenvironment, 2016)

#### **2.3.4. Flor**

Las flores del nopal brotan a partir de las areolas que se localizan en el lomo y en los bordes de la parte superior de las pencas (Figura 4). Sus flores son grandes (7 a 10 centímetros de diámetro) y su color siempre vivo y brillante, puede ser rojo, salmón, rosa, anaranjado o amarillo, esto va a depender de la especie o variedad del nopal. Poseen gran cantidad de estambres cuyos pétalos son delicados (Rosales Cervantes , 2010).



**Figura 4.** Flor de nopal (Arqueología Mexicana, 2009)

### 2.3.5. Fruto

El fruto se asemeja a una baya ovoide y cilíndrica, la cual es conocida como "tuna" (Figura 5), y está disponible en varios colores; su cáscara es correosa, con numerosos grupos de ahuates (espinas muy delgadas o finas) y las semillas de diferentes tonalidades. La dimensión y el tono del fruto varían en función de la especie del nopal (INEGI, 2007).



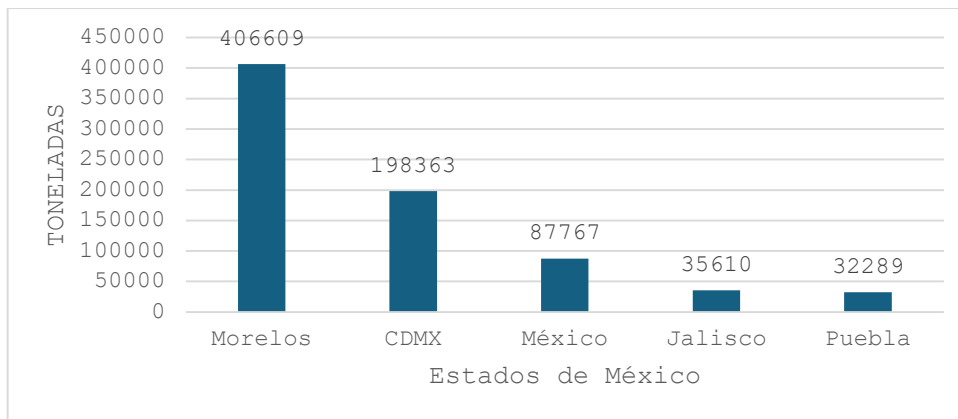
**Figura 5.** Fruto de nopal (Arqueología Mexicana, 2009)

### 2.4. Producción del nopal a nivel nacional e internacional

De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales “México es el primer productor a nivel mundial con 874 mil toneladas de nopal” (SEMARNAT, 2022), de los cuales sus principales estados con mayor producción del nopal según una nota del programa (Altépetl, 2024) de la ciudad de México son:

- Morelos: 406,609 toneladas
- Ciudad de México: 198,363 toneladas
- México: 87,767 toneladas
- Jalisco: 35,610 toneladas
- Puebla: 32, 289 toneladas

Esta información se puede apreciar mejor en la gráfica siguiente (Figura 6), cabe mencionar que México cultiva aproximadamente 872,334 toneladas de nopales en más de 12,365 hectáreas, sin embargo, esta información varía conforme a los años, puesto que no siempre será la misma cantidad de producción de esta verdura.



**Figura 6.** Gráfico realizado con datos obtenidos de la página de Altépetl (Altépetl, 2024).

Como se mencionó anteriormente, México es el país con la mayor producción de nopales a nivel mundial, sin embargo, no es el único país con producción de esta verdura, de acuerdo con la CÁMARA DE COMERCIO E INDUSTRIA ÍTALO-GUATEMALTECA, Sicilia, una región de Italia “Es el tercer mayor productor de nopal en el mundo y el primero en Europa. Después de México y Estados Unidos, el 85% de la producción internacional se concentra en Sicilia” (CAMCIG, 2020).

La producción del nopal tiene que ver con varios factores como lo es los climáticos, geográficos, económicos y culturales, ya que es una verdura endémica de nuestro país y su principal uso es el consumo humano. Recalcando que en otros países no se consume este vegetal o se desconoce, puesto que solo crece en lugares áridos y

semiáridos o simplemente los agricultores de otros países optan por un cultivo más rentable a la demanda local.

## **2.5. Distribución geográfica**

Como lo redacta la CONABIO el género *Opuntia* en México tiene una amplia distribución, en el centro y norte del Altiplano, el noroeste, el Bajío, el Eje Neovolcánico y el valle de Tehuacán-Cuicatlán, son las zonas con mayor abundancia de especies. En las zonas tropicales secas y los desiertos del norte, la abundancia es menor, sin embargo, a menudo se hallan especies endémicas de gran relevancia (CONABIO, 2023).

Sin embargo, algunas especies fueron llevadas a Europa por los españoles tras la conquista de México- Tenochtitlán ya que los marineros acostumbraban a llevar una buena dotación de tunas para evitar el escorbuto.

Tiempo después se llevaron variedades seleccionadas para establecer plantaciones con diversos fines. En la actualidad en muchas regiones semiáridas del mundo ya hay nopaleras silvestres naturalizadas y cultivadas (CONABIO, 2023).

## **2.6. Norma oficial mexicana de tamaños del nopal**

De acuerdo con el artículo llamado las CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE NOPAL VERDURA (*Opuntia ficus-indica*) PARA EXPORTACIÓN Y CONSUMO NACIONAL, en México se aplican dos normas oficiales mexicanas, la NMX-FF-068-SCFI-2006 y la norma internacional Codex Stan 185-1993, ambas defieren en la categoría de clasificación. tamaño, grado de calidad y apariencia (Tabla 2) (Maki-Díaz, y otros, 2015).

**Tabla 2. Componentes de la calidad de nopal verdura incluidos en la norma mexicana NMX-FF-068-SCFI-2006 y la norma internacional Codex Stan 185-1993.**

Característica	Norma Mexicana <sup>1</sup>	Norma Internacional <sup>2</sup>
Calidad	En función de sus especificaciones México Extra; México 1; México 2	En función de sus defectos Categoría Extra; Categoría I; Categoría II
Tamaño/calibre (cm)	A (25.1 o más); B (18.1 a 25); C (11.1 a 18); Cambray (7 a 11)	A (9 a 13); B (13 a 17); C (17 a 21); D (21 a 25); E (25 a 30)
Intervalos de calidad	Por tamaño México Extra: 10 % <sup>3</sup> ; México 1: 15 %; México 2: 20 % Por defectos y por número de piezas	Calidad y calibre Categoría Extra: 5 %; Categoría I: 10 %; Categoría II: 10 %
Disposiciones sobre la presentación	Marcado y etiquetado Envase y embalaje	Homogeneidad, envasado; marcado o etiquetado; identificación, naturaleza y origen del producto; higiene, residuos de plaguicidas

<sup>1</sup>Secretaría de Economía (2013); <sup>2</sup>Codex Alimentarius (2007); <sup>3</sup>Tolerancia permitida en cada categoría ✦ <sup>4</sup>Secretaría de Economía

Fuente: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE NOPAL VERDURA (*Opuntia ficus-indica*) PARA EXPORTACIÓN Y CONSUMO NACIONAL (Maki-Díaz, y otros, 2015).

En la norma NMX-FF-068-SCFI-2006 establece que los nopales sujetos a estas normas deben estar frescos, enteros, sanos, limpios, bien formados, tener sabor y olor característico de la especie y variedad, además de tener una consistencia firme, exentos de humedad exterior anormal, libre de descomposición y presentar la coloración característica de la variedad (Secretaría de Economía).

Con base a la información de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, en la norma internacional Codex Stan 185-1993, de igual manera específica que los nopales sujeto a esta norma deben estar enteros, sanos, limpios, consistencia firme, estar suficientemente desarrollados, presentar un grado de madurez satisfactorio, estar exentos de daños causados por plagas, de humedad externa anormal, olor o sabor extraños, daños causados por bajas temperaturas, de espinas y manchas pronunciadas (FAO).

## 2.7. Uso y beneficios del nopal verdura

El nopal es un alimento muy nutritivo, puesto que su consumo tiene múltiples beneficios para su salud ya que es rica en fibra, antioxidantes y en vitaminas minerales. También popular en varias culturas, especialmente en México en su gastronomía.

De acuerdo con la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural “El nopal es considerado una parte muy importante de la flora y riqueza ecológica de nuestro país. Es protagonista de la cultura popular, la gastronomía y la medicina tradicional” (SADER, 2016).

A continuación, se muestra una tabla sobre el aporte nutrimental que da cada 100 gramos de nopal (Tabla 3):

**Tabla 3. Aporte nutrimental del nopal**

<b>Cada 100 gramos de nopal contienen:</b>	
Energías	27 kcal
Proteínas	1.7 g
Grasa	0.3 g
Carbohidratos	5.6 g
Calcio	93 mg
Hierro	1.6 mg
Vitamina A (Retinol)	41 mcg
Vitamina B (Tiamina)	0.03 mg
Vitamina B2 (Riboflavina)	0.06 mg
Niacina	0.3 mg
Vitamina C (Ácido ascórbico)	8 mg

Fuente: Condimento nutritivo a base de nopal (opuntia spp.) (Cabello Ortiz , Camargo Ríos , Campos Nájera , & García González , 2014).

### **2.7.1. Uso del nopal en la alimentación**

En la gastronomía mexicana, el nopal es uno de los alimentos más tradicionales y se prepara en diversas formas, ya sea hervido, asado, en polvo, guisos, sopas, ensaladas, jugos y dulces. Además, por sus propiedades curativas, en la medicina tradicional, se sigue utilizando para prevenir el cáncer, colesterol, diabetes, fiebre, deshidratación, obesidad, ataques cardíacos, entre otros males (SADER, 2016).

### **2.7.2. Uso del nopal en cosmetología**

La baba de nopal es reconocida por sus múltiples beneficios que tiene sobre la salud y la piel. Su riqueza en vitaminas, minerales y antioxidantes le dan un puesto destacado sobre el cuidado de la piel (Torres Vargas, 2024).

De acuerdo con la nutrióloga Rocío Romero Valdovinos del Hospital General Regional (HGR) número 1 del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) en Tijuana, Baja California, “el nopal contiene vitaminas A, complejo B, C, minerales como calcio, magnesio, sodio, potasio, hierro y fibras en lignina, celulosa, hemicelulosa, pectina, mucílagos y 17 aminoácidos” (IMSS, 2018). Sus compuestos antioxidantes, combaten el envejecimiento prematuro de la piel, puesto que los antioxidantes que contiene la baba de nopal ayudan a mantener la elasticidad de la piel, reduciendo la aparición de arugas (Torres Vargas, 2024).

### **2.7.3. Uso del nopal en medicina**

Por otra parte, en un artículo del Instituto Mexicano del Seguro Social, explica que el consumo de esta verdura ayuda a eliminar el colesterol elevado, estabilizar y regular el nivel de azúcar en la sangre, controlar el exceso de ácidos gástricos,

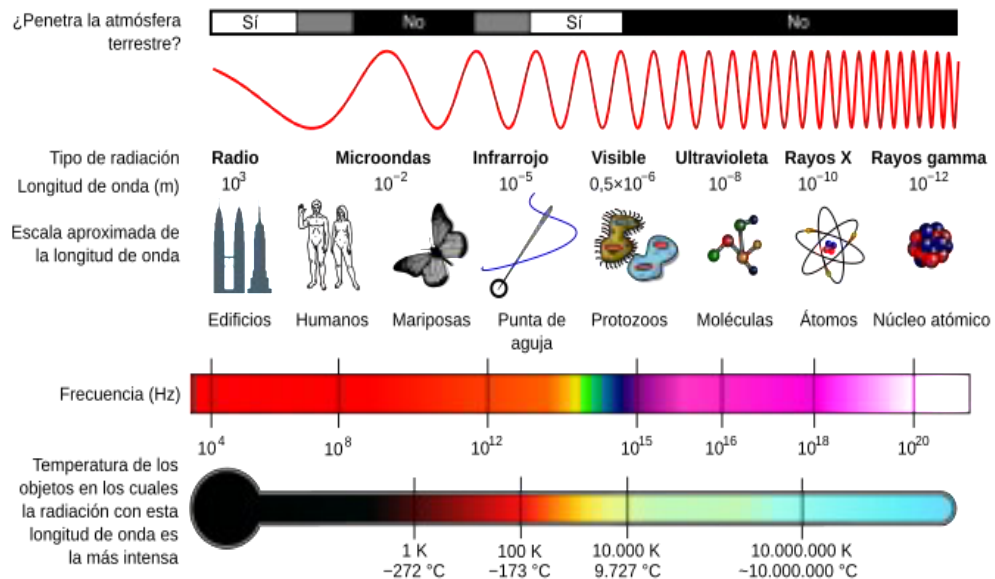
proteger la mucosa gastrointestinal y prevenir las úlceras, además de contener vitaminas, minerales, fibra y aminoácidos que ayudan a eliminar toxinas provocadas por el alcohol y el humo del cigarro (IMSS, 2018).

## 2.8. Espectro electromagnético

Es el conjunto de ondas de todas las radiaciones electromagnéticas (Figura 7).

Esta incluye:

- Rayos gama.
- Rayos X.
- Radiación Ultravioleta.
- Luz Visible.
- Radiación Infrarroja.
- Ondas radioeléctricas.



**Figura 7.** Las propiedades del espectro electromagnético (Cesar's Booklet)

### **2.8.1. Banda espectral**

“Una Banda espectral se refiere a un rango específico de longitudes de onda en el espectro electromagnético que es sensible a ciertos elementos o sustancias en el suelo” ( ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018).

### **2.8.2. Espectro visible**

“Es la parte de espectro electromagnético que los ojos humanos son capaces de detectar. Cubre todos los colores del azul a 400 nm al rojo a 700 nm. La luz azul contiene más energía que la roja” (Scientific Committees, s.f.).

## **2.9. Índices de vegetación**

Los índices de vegetación son combinaciones de diversas bandas espectrales registradas mediante teledetección aérea o satelital, cuyo propósito es resaltar la cubierta o follaje vegetal en función de su reflectancia o absorbancia para obtener datos sobre la condición de salud del cultivo (Kuri, 2023).

A continuación, se enlistan los diferentes tipos de índices de vegetación:

- **EVI (Índice de Vegetación Mejorado)**

El Índice de Vegetación Mejorado se emplea para medir la condición de la vegetación en zonas con gran concentración de biomasa.

- **NDRE (Índice de Diferencia Normalizada del borde Rojo)**

Es un Índice de Vegetación empleado para medir el progreso y la salud de la planta cultivada.

- **GNDVI (El Índice de Vegetación Verde de Diferencia Normalizada)**

El Índice de Vegetación Verde de Diferencia Normalizada se emplea para evaluar de forma cualitativa la actividad fotosintética de las plantas.

- **SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo)**  
El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo, se emplea para resolver el problema de la incidencia del suelo en el Índice NDVI.
- **GCI (Índice de Clorofila Verde)**  
El Índice de Clorofila Verde, se utiliza para calcular la cantidad de clorofila presente en las hojas de diversas especies de plantas.
- **GLI (Índice de Verde Global)**  
El Índice de Hoja Verde es muy útil cuando solo se disponen de imágenes que se encuentran bajo las bandas rojas, verdes y azules (RGB) del espectro visible. Se emplea para distinguir áreas ocupadas por vegetación de la zona que no está cubierta por ella.
- **ReCI (Índice de Clorofila De Borde Rojo)**  
El índice de Clorofila De Borde Rojo mide el nivel de clorofila presente en las hojas. Es útil para determinar cualitativamente la actividad fotosintética del cultivo de interés.
- **SIPI (Índice de Pigmentación Insensible a la Estructura)**  
Índice de Pigmentación Insensible a la Estructura, se emplea cuando hay cambios en la estructura foliar del cultivo. Calcula la relación de carotenoides y clorofila.
- **NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada)**  
El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), se basa en la diferencia entre la cantidad de luz roja visible y la de infrarrojo cercano que refleja la vegetación.

## **2.10. Índice de vegetación de diferencia normalizada**

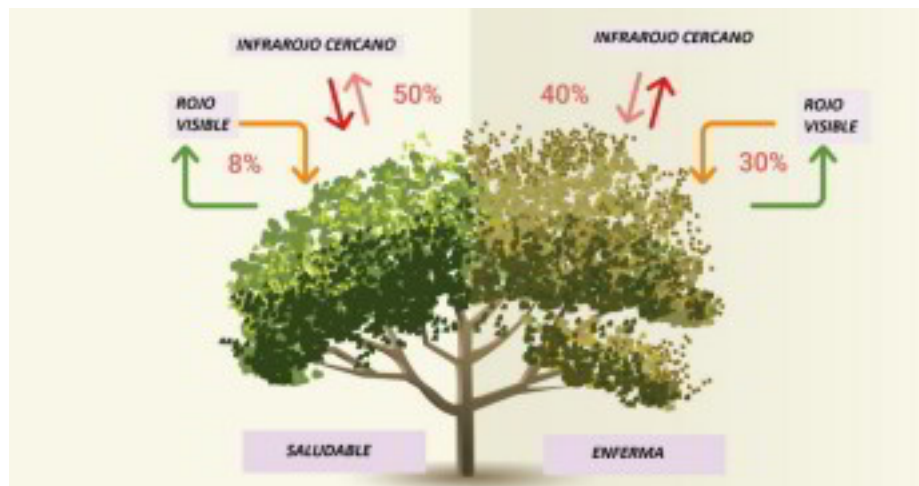
El NDVI ha sido uno de los índices de vegetación más utilizados para la agricultura de precisión en la teledetección desde su introducción en la década de 1970 puesto que aprovecha las ventajas de los datos satelitales y además por la precisión de sus resultados (Toribio, 2019).

### 2.10.1. Como funciona

El NDVI mide la luz en dos espectros, infrarrojo cercano (700–1000 nm) y luz roja visible (620–750 nm) (Karantzalos et al., 2017) y sus valores están entre 0 y 1 en relación con la energía absorbida (radiación fotosintética activa) por los pigmentos de la planta (clorofila) y la luz reflejada por las estructuras celulares (Wang et al., 2003) y puede tomar valores negativos cuando se mide en agua.

En otras palabras, compara matemáticamente la cantidad de luz roja visible absorbida y la luz infrarroja cercana reflejada. “Esto sucede ya que el pigmento de clorofila en una planta sana absorbe la mayor parte de la luz roja visible, mientras que la estructura celular de una planta refleja la mayor parte de la luz infrarroja cercana” (Toribio, 2019).

Esto significa que una vegetación densa tendrá menos reflectancia en la banda roja visible y mayor reflectancia en la banda de infrarrojo cercano (Figura 8).



**Figura 8.** Como funciona el NDVI (EOS DATA ANALYTICS, 2024)

### 2.10.2. Cálculo

De acuerdo con el instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2021) obtiene al calcular la razón (cociente) entre la resta de los valores de las bandas NIR y Roja y la suma de estos:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Donde:

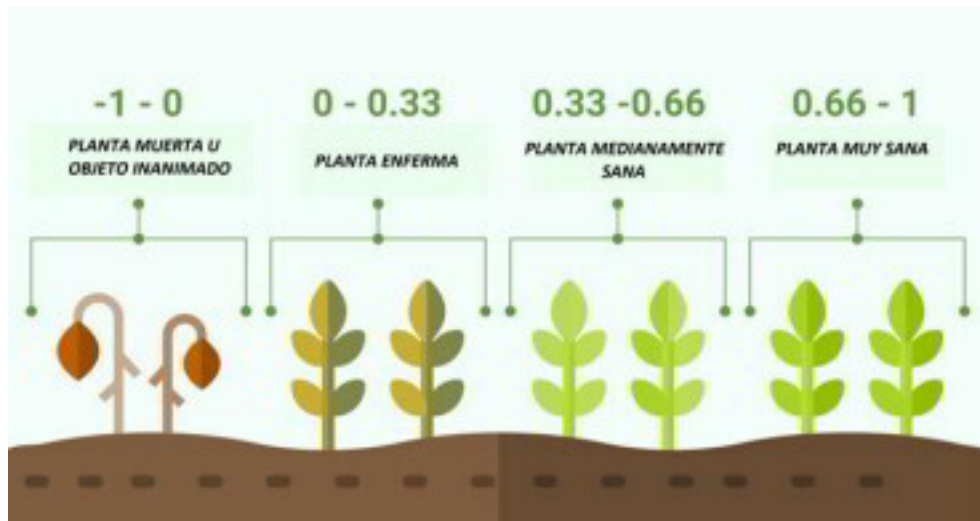
*NIR = luz reflejada en el espectro del infrarrojo cercano.*

*RED = luz reflejada en el rango rojo del espectro.*

### 2.10.3. Interpretación de valores

Es importante saber que el NDVI es un indicador de la salud de la planta y no una forma de diagnosticar una condición en particular, puesto que la sequía, las enfermedades, las plagas o las inundaciones son algunos de los muchos factores que pueden afectar a la vegetación (Kraetzig, 2020).

Los valores de este índice de vegetación oscilan entre -1 y 1. Los valores negativos se asocian a cuerpos de agua y superficies deterioradas por el fuego, en cambio, los valores positivos más bajos (cerca de 0) se relacionan con vegetación en etapa de senectud o con escasa cobertura. Los valores positivos altos (cercanos a +1) representan alto contenido de biomasa fotosintética (Girimonte, Patricia, García Fronti, & Javier, 2020), dicha información se puede apreciar mucho mejor en la siguiente imagen (Figura 9).



**Figura 9.** Interpretación de valores NDVI (EOS DATA ANALYTICS, 2024)

## CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. Información y localización del área experimental

Los tallos de nopalitos Atlixco fueron obtenidos en la comunidad de General Cepeda, Coahuila, México. En un pueblo llamado "El Pilar", su ubicación geográfica es 25°23'0" de latitud norte, 101°27'20" de longitud oeste y una altitud de 1502 m. La variedad Atlixco fue la planta utilizada en el experimento, el estudio se llevó a cabo en el campo agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), ubicada al sur de la ciudad de Saltillo, Coahuila de Zaragoza. Sus coordenadas son: 25°21'00"N 101°01'59"W y 1,786 m sobre el nivel del mar (Figura 10). La temperatura media anual y la precipitación son de 16.9 °C y 435 mm, respectivamente. La siembra tuvo lugar en enero de 2024.



**Figura 10.** Lugar donde se llevó a cabo el experimento

### **3.2. Materiales**

Se hizo uso de diversas herramientas y materiales para llevar a cabo la preparación del terreno y la instalación del sistema de riego, las cuales fueron de suma importancia para el funcionamiento y el avance de este trabajo de investigación.

#### **3.2.1. Herramientas para acondicionamiento del terreno**

Para la preparación del terreno se utilizó herramientas esenciales que nos permitieron acondicionar el área del suelo a trabajar, puesto que estas fueron de ayuda en la limpieza, nivelación y excavación de canales donde se colocaría posteriormente las tuberías para el sistema de riego, además de facilitar la plantación de las pencas del nopal y la formación de bordos en cada tratamiento.

Los materiales necesarios para llevar a cabo el acondicionamiento del terreno a tratar fueron:

- Palas
- Zapapicos
- Flexómetros
- Guantes

#### **3.2.2. Materiales para la instalación del sistema de riego**

Para la instalación y el armado del sistema de riego se emplearon diversos materiales que aseguraron la eficiente dispersión y manejo del agua en los diferentes tratamientos. Entre los principales componentes se encuentran:

- Tubos de PVC (Policloruro de Vinilo)
- Pegamento para PVC

- Codos de unión
- Válvulas de esfera
- Cintas de riego (Cintilla)
- Manómetros
- Taladro
- Brocas

### 3.2.3. GreenSeeker Handheld Crop Sensor

Se hizo uso del instrumento GreenSeeker Handheld Crop Sensor (Figura 11) como herramienta tecnológica para evaluar el estado de vigor de las pencas de nopal mediante la lectura del NDVI. Esta sonda permite realizar mediciones rápidas y no destructivas de la vegetación al analizar cuanta luz roja e infrarroja se refleja de la planta. Su uso facilitó el monitoreo y obtención de datos sobre el cambio de salud de las pencas, debido a los diferentes tiempos de riego que se le aplicó a cada tratamiento.



**Figura 11.** GreenSeeker Handheld Crop Sensor (PTx Trimble, s.f.)

### 3.2.4. FieldScout TDR 300

Para la medición del contenido volumétrico de agua (VWC) en el suelo, se utilizó la FieldScout TDR 300 (Figura 12), la cual fue de ayuda para mantener la cantidad de agua de cada tratamiento, debió que cada tratamiento se le estableció una cantidad específica de agua en el suelo, además de no poder ser regadas en caso de que la cantidad de agua no estuviera debajo a la definida.



**Figura 12.** FieldScout TDR 300 (Spectrum Technologies, Inc.)

### 3.3. Metodología

El estudio se llevó a cabo en un campo agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Se procedió a preparar el terreno con ayuda de maquinaria agrícola, para posteriormente extraer las 320 pencas y ser replantadas. Ya plantadas se instaló el sistema de riego que permitiría controlar los tiempos de riego para cada tratamiento, para evitar que el agua de los demás tratamientos se escurriera, se limitó a cada tratamiento con un bordo y a su vez para su fácil identificación se hizo uso de una etiqueta o banderilla.

En este experimento, la posición de los tratamientos en el terreno fue al azar, con un testigo (T) y tres tratamientos (T1, T2 y T3). Tanto los tratamientos y los testigos

llevaron consigo cinco repeticiones (R1, R2, R3, R4 y R5), que fueron fundamentales para llevar a cabo este estudio, puesto que al ser más repeticiones se podría obtener mejores resultados de NDVI, para finalmente evaluar el impacto del estrés hídrico que tuvo cada tratamiento bajo este índice de vegetación.

Cabe recalcar que cada tratamiento tenía un diferente tiempo de regado y este no podría ser regada en caso de que la humedad no estuviera por debajo de la ya establecida (Tabla 4). La medición y recopilación de datos de NDVI se realizó una vez por semana en cada tratamiento.

### **3.3.1. Extracción del nopal**

La extracción de las pencas de nopal se realizó en el municipio de General Cepeda, Saltillo, Coahuila, en un ejido llamado el “Pilar”, el cual se hizo la extracción cuidadosamente de 320 pencas en un campo de nopales (Figura 13 y 14) con trabajo de compañeros de la carrera. Para una selección adecuada de las pencas, estas deberían poseer las siguientes características:

- Estar libre de plagas o enfermedades, sin agujeros, pudrición o la presencia de insectos.
- Que sean pencas maduras, pero no viejas de entre 6 a 12 meses.
- Color verde intenso sin manchas amarillas o marrones.
- Tener un tamaño adecuado que oscile entre los 20 a 30 cm.



**Figura 13.** Extracción de las pencas de nopal.



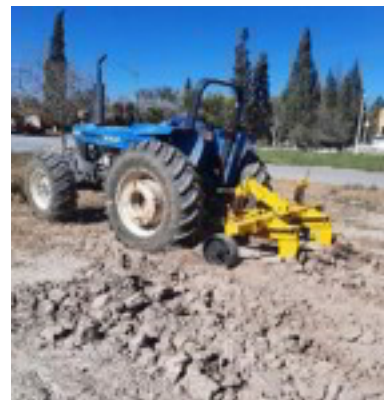
**Figura 14.** Campo de Nopales.

### **3.3.2. Preparación del terreno**

Para su preparación se hizo uso de la maquinaria y de dos implementos, la rastra (Figura 15) cuya función fue desmenuzar y a nivelar el suelo y posteriormente el subsolador (Figura 16) para romper las capas compactadas del suelo puesto que esta se compactó por el peso del tractor.



**Figura 15.** Maquinaria con rastra.



**Figura 16.** Maquinaria con subsolador

### 3.3.3. Plantación

Una vez que el terreno estuvo listo, se procedió a plantar las pencas ya seleccionadas tomando en cuenta los siguientes puntos:

- Espaciado: 0.30 metros entre pencas y 1 metro de separación entre surcos.
- Profundidad para plantar: Alrededor de 10 a 15 centímetros de profundidad.
- Colocación: Esta se colocó de forma vertical y lo más derecho posible, sin tener tan enterrada la penca en el suelo.
- Orientación: Las caras de las pencas fueron orientadas al este.

Teniendo en claro los puntos anteriores se plantaron las 320 pencas con ayuda de más compañeros (Figura 17), siempre respetando las distancias entre pencas, surcos y columnas.

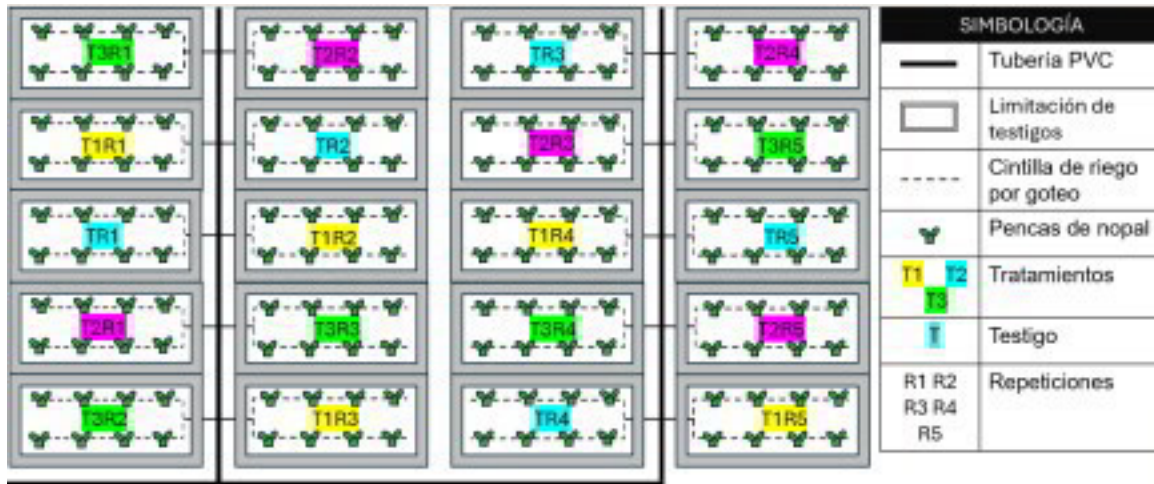


**Figura 17.** Plantación de pencas

### 3.3.4. Instalación de sistema de riego

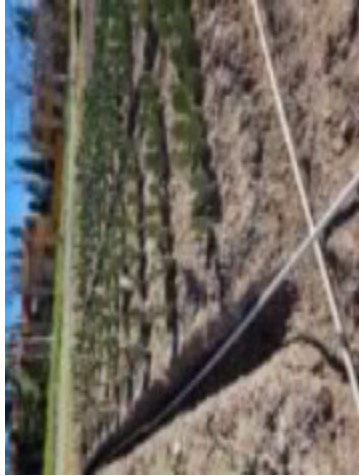
Para este experimento se necesitó la instalación de un sistema de riego, puesto que el objetivo principal es medir el NDVI de los diferentes tratamientos con base en las diferentes horas de riego para cada tratamiento. Por lo tanto, se dio la propuesta

de la instalación de un sistema de riego (Figura 18) el cual se recurrió a un profesor experimentado del departamento de riego de esta misma institución (UAAAN) para su asesoramiento y así saber que materiales emplear en toda la instalación de este sistema.

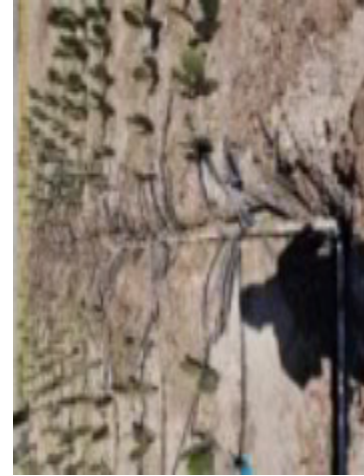


**Figura 18.** Propuesta de sistema de riego.

Teniendo ya los materiales de dicha propuesta se inició con la excavación de zanjas para meter y enterrar los tubos de PVC (Figura 19) que darían con el recorrido del agua a todas las pencas plantadas haciendo uso de cintillas de riego (Figura 20), las cuales fueron extendidas por cada fila de las pencas de nopal, de igual forma, se instaló llaves de paso en todas las uniones de cintilla para tener un mejor control de riego en cada tratamiento.



**Figura 19.** Instalación de tuberías



**Figura 20.** Instalación de cintillas

### **3.3.5. Limitación y etiquetado de tratamientos**

Se delimitaron las filas y columnas de los diferentes tratamientos con bordos con la finalidad de tener un área específica de riego y así evitar la afectación por agua de otros tratamientos. Esta delimitación se puede observar en la propuesta de sistema de riego (Figura18).

Por último, para hacer más fácil el reconocimiento de los tratamientos en el terreno de estudio, se les ancló o etiquetó una banderilla con sus respectivos datos, mismos que se pueden observar en la imagen (Figura 21).



**Figura 21.** Etiquetado de tratamientos.

### 3.3.6. Riego

Una vez establecido los materiales e identificación de las muestras, se dio inicio con los diferentes tipos de riego (Tabla 4) a los tratamientos una vez a la semana, cada tratamiento tuvo un tiempo de riego diferente, siempre y cuando cumplieran una regla: que VWC% (Porcentaje de Contenido de Agua Volumétrico) la cantidad de agua en el suelo no sobrepasara a la establecida, puesto que, si se regaba de más, habría el riesgo de alterar los datos obtenidos.

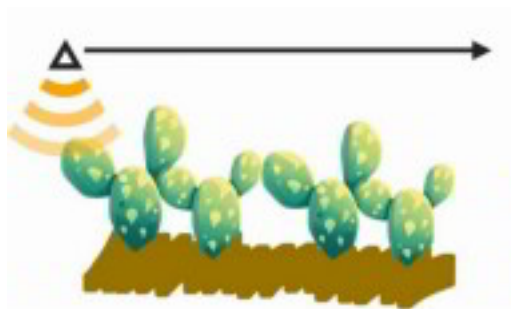
**Tabla 4. Tiempo de regado**

	<b>VWC%</b>	<b>Tensión (kPa)</b>	<b>Minutos</b>	<b>Horas</b>
T1	31.67	30	183	3:03:00
T2	27.05	45	199.6	3:19:36
T3	19.37	70	223.5	3:43:30
T	---	---	---	3:43:30

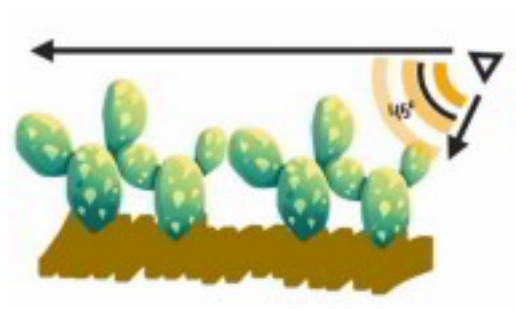
### 3.3.7. Medición

La medición del NDVI se llevó a cabo cada semana con ayuda del instrumento GreenSeeker Handheld Crop Sensor (Figura 11), el cual fue de suma importancia para este experimento puesto que facilitó la toma de datos.

La medición se hizo de dos formas, la primera fue pasando de forma horizontal sobre toda la fila de pencas, tomando la sonda a un ángulo de  $90^\circ$  (Figura 22), la segunda medición se hizo de la misma manera, sin embargo, se tomó la sonda a un ángulo de 45 grados con respecto a una de las caras de las pencas (Figura 23). Todas las mediciones tomadas se realizaron en un horario de 12:00 a 14:00 horas del día.



**Figura 22.** Medición a  $90^\circ$ .



**Figura 23.** Medición a  $45^\circ$ .

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con el análisis de varianza realizado mediante el software Minitab, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados en relación con el índice de vegetación NDVI. El valor de F obtenido fue de 1.26 con un valor p de 0.300, lo que significa que  $p > 0.05$ . Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula, concluyéndose que los tratamientos aplicados no generaron efectos diferenciados significativos sobre los valores de NDVI.

**Tabla 5. Análisis de varianza (ANOVA) para NDVI**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tratamiento	3	0.006428	0.002143	1.26	0.300
Error	40	0.067884	0.001697		
Total	43	0.074313			

**Hipótesis Nula:** El estrés hídrico no tiene un efecto significativo en el NDVI del nopal verdura.

El NDVI que deduce el verdor se mantuvo similar entre tratamientos, el índice espectral no presentó diferencias significativas entre tratamientos, esto muestra que se tiene una buena tasa fotosintética ya que ayuda a estimar la biomasa. Lo cual es mencionado por Jardim et al., 2023 donde se evaluó el NDVI en Nopalea cochenillifera obteniendo un valor promedio de 0.19, comparándolo con el cultivo de estudio realizado, en donde se obtuvieron valores entre 0.48 y 0.51. Los valores nos permiten determinar si la vegetación está sana o enferma, ya que los valores cercanos a 1 indican que las

plantas tienen buena nutrición (Gaytan et al., 2021). Estos valores son similares a los obtenidos por da Silva et al., 2021 al medir el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) que varió de 0.1 a 0.5 en el cultivo de *Opuntia stricta* (Haw.) y *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck.

#### 4.1. Comparación de medias para el NDVI

La comparación de medias realizada con el software Minitab mostró que **no existe diferencias estadísticamente significativas** entre los tratamientos evaluados en cuanto al índice de vegetación NDVI. Todos los tratamientos (T, T1, T2 y T3) presentaron valores similares, comprendidos entre 0.51 y 0.53, y compartieron la misma letra (“a”) en la prueba de comparación de medias, lo cual indica que pertenece al mismo grupo estadístico. Esta evidencia se encuentra en concordancia con el análisis de varianza (ANOVA), en el cual se obtuvo un valor p de 0.300 ( $p > 0.05$ ), confirmando que los tratamientos no generaron efectos significativamente diferentes sobre el NDVI bajo las condiciones del presente estudio.

**Tabla 6. Comparación de medias**

Tratamiento	NDVI		Letras (Grupos estadísticos)
	(Media $\pm$ Error)		
T	0.53	0.02	a
T1	0.51	0.03	a
T2	0.52	0.03	a
T3	0.51	0.02	a

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

No se encontraron diferencias significativas en el NDVI entre tratamientos, lo que sugiere una actividad fotosintética estable en todas las condiciones. Los valores del NDVI indican que las plantas mantuvieron un estado nutricional saludable, lo cual concuerda con su capacidad para sobrevivir y crecer bajo estrés hídrico. Los parámetros de temperatura del suelo, la planta madre y el cladodio no mostraron diferencias significativas, lo que indica que estos factores se mantuvieron estables incluso bajo diferentes condiciones de estrés hídrico.

Debido a que no hubo diferencias significativas en el NDVI entre los tratamientos, se recomienda realizar el experimento con diferentes parámetros en tiempo de riego y contenido volumétrico de agua en el suelo, con la finalidad de estresar más al cultivo y ver si así se obtiene diferencias significativas en el NDVI, recordando que se trata de una planta capaz de vivir en zonas desérticas, además de tolerar muy bien el calor extremo y la sequía.

## BIBLIOGRAFÍAS

- ISPRS** Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. (2018). *ScienceDirect*. Retrieved from Spectral Band: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/spectral-band>
- Altépetl**. (2024, Septiembre 18). Retrieved from Uno de Cada 5 Nopales Que Se Consumen Es Chilango: <https://altepetl.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/uno-de-cada-5-nopales>
- Arqueología Mexicana**. (2009). *Arqueología Mexicana*. Retrieved from Las partes del nopal: <https://arqueologiamexicana.mx/mexico-antiguo/las-partes-del-nopal>
- Cabello** Ortiz, M. F., Camargo Ríos, K., Campos Nájera, D., & García Gonzáles, M. F. (2014, Febrero 19). *CONDIMENTO NUTRITIVO A BASE DE NOPAL (OPUNTIA SPP.)*. Retrieved from CONDIMENTO NUTRITIVO A BASE DE NOPAL (OPUNTIA SPP.): <https://vinculacion.dgire.unam.mx/vinculacion-1/Congreso-Trabajos-pagina/PDF/Congreso-Estudiantil-2014/Proyectos-2014-Area/Ciencias-Biologicas/biologia/1.6%20CIN2014A10202.pdf>
- CAMCIG**. (2020, FEBRERO 15). *ITALIA 3er PRODUCTOR MUNDIAL DE NOPAL*.
- Cesar's** Booklet. (n.d.). *El espectro electromagnético*. Retrieved from [https://cesar.esa.int/upload/201807/espectro\\_electromagnetico\\_booklet.pdf](https://cesar.esa.int/upload/201807/espectro_electromagnetico_booklet.pdf)
- CONABIO**. (2023, Junio 22). *Nopales*. Retrieved from Biodiversidad Mexicana: <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/nopales>
- Dreamstime**. (n.d.). Retrieved from Opuntia cactus con raíces de puntos vista de cerca: <https://www.dreamstime.com/opuntia-cactus-dots-roots-close-up-view-opuntia-cactus-dots-roots-close-up-view-image209900510>
- EOS DATA ANALYTICS**. (2024, Marzo 22). Retrieved from Preguntas Frecuentes de NDVI: Todo Lo Que Necesita Saber Sobre el Índice: <https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/>

- FAO.** (n.d.). *FAO*. Retrieved from Norma para el nopal: [https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/ar/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXS%2B185-1993%252FCXS\\_185s.pdf](https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/ar/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXS%2B185-1993%252FCXS_185s.pdf)
- Girimonte, Patricia, García Fronti, & Javier.** (2020). *EL INDICE NDVI Y LA CLASIFICACIÓN DE ÁREAS SEMBRADAS APRENDIZAJE AUTOMÁTICO NO SUPERVISADO “K-MEANS”*. Retrieved from <https://www.economicas.uba.ar/wp-content/uploads/2016/04/Girimonte-Garcia-Fronti.pdf>
- Hernández Gómez, M.** (2017, Agosto). *“Identificación de la especie del picudo que afecta a la espina del nopal (Opuntia-ficus indica) en el Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, México”*. Retrieved from <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/67838/Tesina%20Fernanda%20nopal%202017.pdf?sequence=3>
- Hydroenvironment.** (2016, Diciembre 21). *Hydroenvironment*. Retrieved from ¿POR QUÉ ES BUENO CONSUMIR NOPAL REGULARMENTE?: <https://hidroponia.mx/por-que-es-bueno-consumir-nopal-regularmente/>
- IMSS.** (2018). *Nopal, auxiliar en el control de la diabetes y la hiperglucemia: IMSS*. Retrieved from Gobierno de Mexico: <https://www.imss.gob.mx/prensa/archivo/201810/265>
- INEGI.** (2007). *Características principales del cultivo de nopal en el Distrito Federal Caso Milpa Alta*. Retrieved from INEGI: [https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/agropecuario/2007/agricola/nopal\\_df/CulnopDF.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/agropecuario/2007/agricola/nopal_df/CulnopDF.pdf)
- INEGI.** (2021). *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada*. Retrieved from INEGI: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/889463908272.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463908272.pdf)

- Kraetzig**, N. M. (2020, Septiembre 1). Retrieved from <https://up42.com/blog/5-things-to-know-about-ndvi>
- Kuri**, J. (2023, Mayo 19). *Geospectral*. Retrieved from Indice de vegetacion : <https://geospectral.com.mx/blogs/agras-1/indices-de-vegetacion>
- 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 EXPORTACION Y CONSUMO NACIONAL. *Agrociencia*, 33.
- México** desconocido. (n.d.). *México desconocido*. Retrieved from Nopal, beneficios y características: <https://www.mexicodesconocido.com.mx/nopal-beneficios-y-caracteristicas.html>
- PTx Trimble**. (n.d.). Retrieved from GreenSeeker Handheld Crop Sensor: <https://ww2.agriculture.trimble.com/product/greenseeker-handheld-crop-sensor/>
- Rosales Cervantes** , R. F. (2010, Junio). Retrieved from Repositorio UAAAN: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/2423/RAMON%20FERNANDO%20ROSALES%20CERVANTES.pdf?sequence=1>
- SADER**. (2016, Septiembre 24). *Nopal, indiscutiblemente mexicano*. Retrieved from <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/nopal-indiscutiblemente-mexicano>
- Scientific Committees**. (n.d.). Retrieved from Espectro electromagnético: <https://ec.europa.eu/health/opinions/es/lamparas-bajo-consumo/glosario/def/espectro-electromagnetico.htm>
- Secretaría de Economía**. (n.d.). Retrieved from <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2007/nmx-ff-068-scfi-2006.pdf>
- SEMARNAT**. (2020, Diciembre 04). *Gobierno de México*. Retrieved from La riqueza del nopal: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/la-riqueza-del-nopal?idiom=es>

- SEMARNAT.** (2022, Septiembre 18). *Día nacional del Nopal 2022*. Retrieved from Gobierno de Mexico: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/dia-nacional-del-nopal-2022>
- Spectrum Technologies, Inc.** (n.d.). *Manual del usuario*. Retrieved from [https://www.kosmos.com.mx/wp-content/uploads/2018/01/6430FS\\_TDR300.pdf](https://www.kosmos.com.mx/wp-content/uploads/2018/01/6430FS_TDR300.pdf)
- Toribio, G.** (2019, Octubre 25). Retrieved from Curso Teledeteccion: <https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>
- Torres Ponce, R. L., Morales Corral, D., Ballinas Casarrubias, M., & Nevárez Moorillón, G. V.** (2015, Agosto). *Scielo*. Retrieved from El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342015000500018](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000500018)
- Torres Vargas, C. E.** (2024, Mayo 09). *INFOBAE*. Retrieved from Estas son las propiedades regenerativas para la piel de la baba de los nopales: <https://www.infobae.com/mexico/2024/05/09/estas-son-las-propiedades-regenerativas-para-la-piel-de-la-baba-de-los-nopales/>
- Ungemach, J., & Saburido, S.** (2016, Abril 28). *BOTÁNICA BÁSICA PARA LA CONSERVACIÓN DE SEMILLAS*. Retrieved from <https://somossemilla.org/wp-content/uploads/2017/06/taller-vc3ada-orgc3a1nica-abril-2016.pdf>