

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA**



Generación de modelo de predicción de rendimiento de maíz forrajero  
a base de NDVI

Por:

**THAYLI PAOLA VELÁZQUEZ HERNÁNDEZ**

TESIS

**Presentada como requisito parcial para obtener el título de:**

**INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Noviembre de 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA

Generación de modelo de predicción de rendimiento de maíz forrajero  
a base de NDVI

Por:

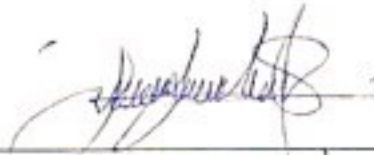
**THAYLI PAOLA VELÁZQUEZ HERNÁNDEZ**

TESIS

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

**INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA**

Aprobada por:



MC. Gilbert Fresh López López  
Asesor principal



M.C. Juan Antonio López López  
Asesor



Dr. Mario Alberto Méndez Dorado  
Asesor



MC. Sergio Sánchez Martínez  
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Noviembre de 2025

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme la fuerza y el entendimiento para alcanzar esta meta.

A Mayra Hernández Gómez y Arvey Velázquez Santos por ser los pilares que me han sostenido en toda mi vida

A Jesús Velázquez Hernández y Ubelda Santos Vázquez quienes siempre estuvieron a mi lado con palabras de cariño y motivación.

Antonio Hernández García e Isalia Gómez Guevara por ser las personas que creyeron en mí y me brindaron su apoyo incondicional en cada etapa.

A Miriam Hernández Gómez, Elvia Hernández Gómez que han aconsejado y guiado en mí camino.

A mi asesor de tesis por creer en mí, orientarme y apoyarme en cada paso.

A todos los mencionados, mis más grandes agradecimientos.

## **DEDICATORIA**

### **A MAYRA HERNÁNDEZ GÓMEZ Y ARVEY VELÁZQUEZ SANTOS:**

Por todo lo que han hecho por mí, gracias por siempre impulsar cada uno de mis sueños y apoyarme en alcanzar todos mis objetivos.

Sin duda son dos personas que admiro y amo con todo el corazón.

### **A JESÚS VELÁZQUEZ HERNÁNDEZ Y UBELDA SANTOS VELÁZQUEZ:**

En memoria y con el corazón en la mano dedico a mi abuelo Jesús quien siempre me brindó su amor incondicional gracias por todos los consejos.

A mi abuela Ubelda quien con sus palabras de apoyo me han abrazado a la distancia, impulsándome a seguir.

### **ANTONIO HERNÁNDEZ GARCÍA E ISALIA GÓMEZ GUEVARA:**

Con cariño y admiración para Antonio e Isalia que desde pequeña han estado conmigo, me han tomado de la mano y me han enseñado lo que significa el amor y el trabajar por lo que quieres, gracias por su apoyo incondicional y amarme como a una hija, les debo lo que soy.

### **A Miriam Hernández Gómez y Elvia Hernández Gómez:**

Dos mujeres fuertes que admiro por su inteligencia y dedicación me han enseñado a seguir mis metas gracias por siempre estar para mí.

### **A Ximena, Camila, Antonio Márquez, Fernanda, Alexa, Jorge e Ivana:**

Por darme la oportunidad de formar parte de sus vidas, son motivo de muchas de mis alegrías e inspiración de mi superación.

## TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Objetivos .....	2
1.2 Hipótesis .....	3
CAPÍTULO II REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
2.1 Maíz demanda de producción. ....	4
2.1.1 Nivel mundial.....	4
2.1.2 Nacional .....	5
2.1.3 Regional.....	5
2.2 Maíz forrajero .....	6
2.2.1 Nivel mundial.....	6
2.1.2 Nivel nacional .....	6
2.1.3 Nivel regional.....	8
2.3 Comportamiento del maíz etapas fenológicas .....	8
2.4 Compactación de suelo y como afecta el desarrollo radicular en el maíz .....	9
2.5 Métodos de muestreos de raíz .....	10
2.6 Métodos de estimación de rendimientos .....	10
2.7 Modelos de estimación de rendimiento .....	11
2.8 Agricultura de conservación de suelo .....	11
2.9 Sistemas de labranza .....	11
2.9.1 Labranza tradicional .....	11
2.9.2 Labranza vertical .....	12
2.9.3 Labranza cero .....	12
2.10 Agroecología .....	13
2.11 Antecedentes .....	13
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS .....	14
3.1 Ubicación y características del experimento.....	14
3.2 Planificación de siembra.....	14
3.3 Recolección de datos .....	15
3.4 Análisis de datos .....	16
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	17
4.1 Germinación y emergencia.....	17

4.2 Efectos de sistemas de labranza en el volumen de desarrollo radicular primera etapa.....	18
.....	22
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	23
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	24

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Países con mayor producción de maíz.....	4
<b>Figura 2.2</b> Evolución de la producción nacional de maíz forrajero (SIAP, 2019) ....	8
<b>Figura 2.3</b> Volumen (en toneladas) de las principales entidades productoras del país (SIAP, 2019). .....	8
<b>Figura 2.4</b> Etapas fenológicas de la fase vegetativa y reproductiva del maíz.....	11
<b>Figura 2.5</b> Etapas fenológicas del maíz dividido por días.....	9
<b>Figura 2.6</b> Comparación labranza vertical contra convencional .....	12
<b>Figura 3.1</b> Campo experimental; LV; labranza vertical, LC; labranza cero, LT; labranza tradicional. ....	14
<b>Figura 4.1</b> Diagrama de cajas de la población del cultivo.....	24
<b>Figura 4.2</b> Histograma y prueba de Shapiro-Wilk de los datos de la primera etapa .....	18
<b>Figura 4.3</b> Histograma y prueba de Shapiro-Wilk con datos transformados.....	19
<b>Figura 4.4</b> Gráfica de comparación de medias .....	20
<b>Figura 4.5</b> Modelo de predicción de rendimiento a base de volumen de raíz del cultivo .....	21
<b>Figura 4.6</b> Modelo de predicción de rendimiento a base de NDVI.....	21
<b>Figura 4.7</b> Modelo de predicción de rendimiento a base de NDVI.....	29

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La compactación del suelo se ha convertido en uno de los principales desafíos para la agricultura moderna. El incremento en el tamaño y peso de la maquinaria agrícola durante las últimas décadas ha provocado que los suelos reciban mayores cargas mecánicas, especialmente debido a la expansión de las áreas de cultivo y la necesidad de operar con mayor rapidez para cubrir más superficie. En este contexto, prácticas como la siembra temprana de maíz, que buscan maximizar el rendimiento, pueden realizarse en condiciones de humedad inadecuadas, favoreciendo aún más la compactación del terreno (Mark, 2024).

Entre los factores que contribuyen a este problema, los sistemas de labranza tradicional destacan como una de las causas más comunes de degradación del suelo. El uso repetido de implementos que remueven y voltean la tierra modifica de manera significativa la estructura natural del suelo, reduciendo la infiltración de agua y aire. Esta alteración genera restricciones para el desarrollo radicular, ocasionando raíces deformadas o con crecimiento horizontal en lugar de vertical. Como consecuencia, el cultivo puede presentar menor vigor, plantas de menor tamaño y rendimientos inferiores; además, este sistema exige un mayor consumo de combustible debido al uso intensivo de maquinaria.

Ante esta problemática, la agricultura de conservación ha surgido como una estrategia eficaz para disminuir los procesos de degradación. La labranza cero, una de sus prácticas principales, propone reducir al mínimo la remoción del suelo con el fin de preservar su estructura, disminuir costos operativos y limitar las emisiones asociadas al uso de maquinaria. Al mantener los residuos vegetales y evitar el disturbio del terreno, se conservan mejor los nutrientes, se favorece la infiltración y se reduce la erosión.

De manera complementaria, la labranza vertical se ha planteado como una alternativa para mejorar la preparación del suelo sin generar el deterioro típico de la labranza convencional. (Reynolds et al., 2020) señalan que esta tecnología permite

disminuir el consumo de combustible y optimizar el manejo del suelo mediante la fractura vertical de capas compactadas, mejorando la aireación y facilitando el desarrollo radicular. Aunque implica el uso de implementos, sus efectos sobre el ambiente y la eficiencia energética presentan ventajas claras frente a los métodos tradicionales.

Al utilizar un adecuado sistema de labranza, sumado a la agricultura de precisión, se puede lograr obtener un modelo de predicción de rendimiento, el cual proyectará la producción prevista.

El propósito de esta investigación, es determinar un modelo de predicción de rendimiento de maíz forrajero, además de determinar bajo qué condiciones se puede cumplir dicho modelo, tomando en cuenta el sistema de labranza, realizando un análisis en base al NDVI y desarrollo radicular de la planta, con ello contribuimos a poder estimar la producción, así como determinar las condiciones óptimas para su desarrollo, disminuyendo gastos en insumos y reduciendo el impacto al suelo; esto sumado con la agricultura de precisión para lograr obtener una alta producción conservando lo mayor posible los suelos.

## **1.1Objetivos**

### **Objetivo general:**

- Generar un modelo de rendimiento.
- Comparar el porcentaje de rendimiento en los tres tipos de labranzas.

### **Objetivos específicos:**

Formular un modelo matemático de rendimiento para maíz forrajero mediante el uso de NDVI, con la finalidad de anticipar el rendimiento de su producción y detectar las zonas donde no exista un buen aprovechamiento.

Analizar si hay una diferencia significativa en cada una las labranzas, de esta manera se podrá elegir una labranza que cumpla con los requerimientos para

lograr un buen desarrollo radicular y conseguir el mejor rendimiento en la producción de maíz forrajero.

## **1.2 Hipótesis**

Esta investigación tiene como objetivo principal desarrollar un modelo matemático que permita estimar el rendimiento del cultivo de maíz forrajero mediante el análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). A través de la evaluación de este indicador, se busca identificar la práctica de labranza que contribuya a maximizar la productividad del cultivo.

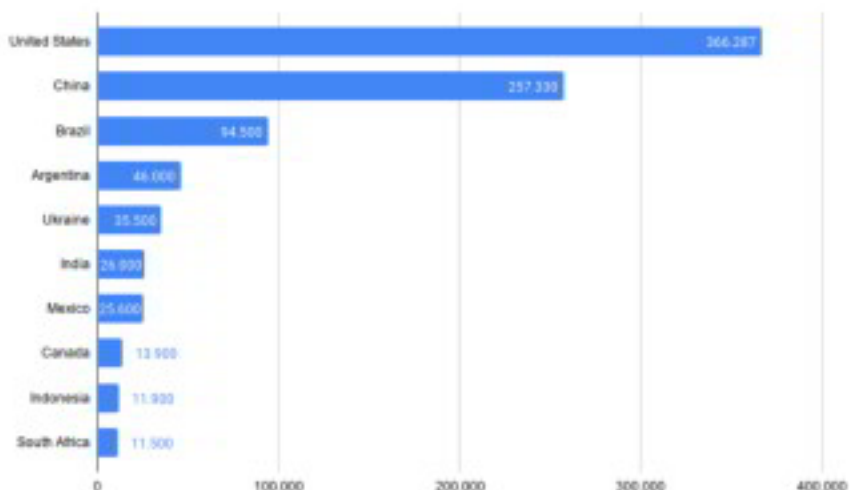
## CAPÍTULO II REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Maíz demanda de producción.

#### 2.1.1 Nivel mundial

El maíz es uno de los cultivos más importantes a nivel global debido a su amplio uso alimentario, industrial y energético como se observa en la Figura 2.1. De acuerdo con datos recientes de la FAO, la producción mundial ha mostrado una tendencia de crecimiento durante los últimos años, alcanzando más de 1,160 millones de toneladas en 2020. Este incremento ha sido impulsado por la expansión del área sembrada, que pasó de 196 millones de hectáreas en 2019 a más de 201 millones en 2020, así como por la creciente demanda de productos derivados del maíz, tanto para consumo humano como para la elaboración de biocombustibles y subproductos industriales.

En el comercio internacional, el maíz también tiene un papel fundamental. El USDA reporta que, en el ciclo 2021/2022, las exportaciones globales superaron los 181 millones de toneladas, destacando Estados Unidos, Brasil y Argentina como los principales exportadores. Paralelamente, la demanda continúa aumentando por el crecimiento del sector ganadero, que requiere grandes volúmenes de maíz como base para la producción de alimento balanceado, lo cual mantiene al cultivo como un componente clave en la seguridad alimentaria mundial (Mordor Intelligence, 2024).



**Figura 2.1** Países con mayor producción de maíz.

### **2.1.2 Nacional**

En México, el maíz es un cultivo estratégico tanto por su importancia cultural como por su papel en la producción agrícola nacional. De acuerdo con él (SIAP, 2021), la disponibilidad de maíz amarillo presentó un ligero incremento en el ciclo 2020/2021, impulsado por un aumento en la producción nacional y las importaciones. Aunque la superficie sembrada ha tenido variaciones mínimas, la producción continúa siendo suficiente para cubrir gran parte de la demanda interna.

Durante el ciclo primavera–verano 2020 se sembraron más de 454 mil hectáreas, de las cuales se cosecharon alrededor de 410 mil, obteniéndose 2.4 millones de toneladas. Para el ciclo otoño–invierno 2020–2021 se estimaron más de 764 mil toneladas de maíz amarillo, lo que representó un incremento significativo respecto al ciclo anterior, especialmente por el aumento en la intención de siembra, destacando que el estado de Tamaulipas aportó más del 80% del volumen en ese ciclo (SIAP, 2021).

### **2.1.3 Regional**

En el estado de Coahuila, el maíz es uno de los cultivos más importantes para el sector agropecuario. De acuerdo con él (Paquete tecnologico del maíz, 2024), se siembran aproximadamente 37,130 hectáreas, de las cuales el 88% se encuentran en la región Sureste del estado. La mayor parte de esta superficie es de temporal, con rendimientos promedio de 650 kg/ha, mientras que bajo condiciones de riego los rendimientos alcanzan hasta 2,200 kg/ha.

En un estudio de (Rincón et al., 2010), se reporta que entre 2001 y 2008 se sembraron cerca de 27.8 mil hectáreas en el sureste de Coahuila, donde casi el 97% correspondió a agricultura de temporal, con un rendimiento promedio de 0.68 t/ha. Estos datos reflejan la importancia del recurso hídrico en la productividad y la necesidad de mejorar las prácticas de manejo para aumentar la eficiencia del cultivo en la región.

## **2.2 Maíz forrajero**

### **2.2.1 Nivel mundial**

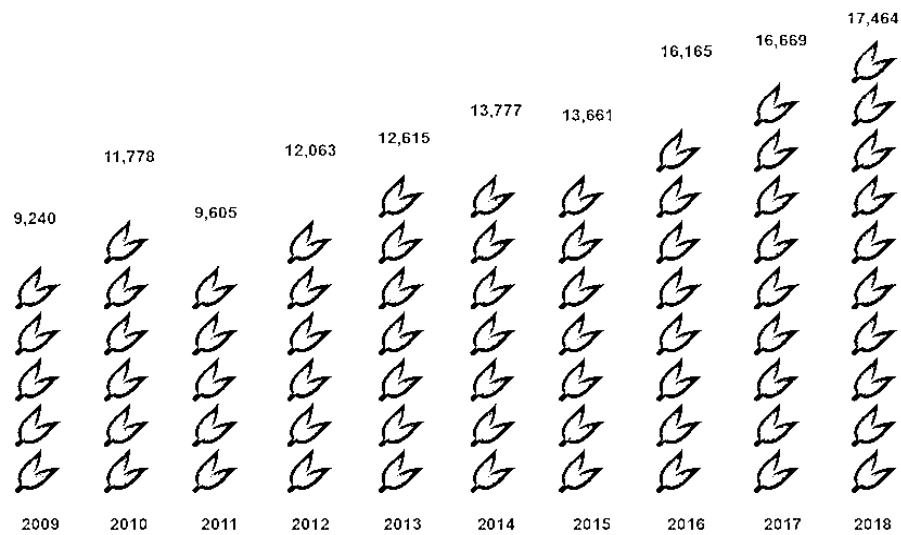
El maíz forrajero es un componente fundamental en la producción ganadera debido a su aporte energético y su alta digestibilidad. A nivel mundial es el segundo cultivo en importancia, solo por debajo del trigo en volumen, y es el primero en rendimiento de grano por hectárea. Su adaptabilidad es muy amplia puede cultivarse desde regiones tropicales hasta zonas templadas de Canadá, Rusia y el Cono Sur de América. (FAO, 2024)

A nivel global, la producción de grano supera los 850 millones de toneladas anuales, cultivadas en una superficie mayor a 160 millones de hectáreas. Estados Unidos y China aportan más del 50% de la producción total. En cuanto a maíz forrajero específicamente, Estados Unidos lidera con más de 2.6 millones de hectáreas destinadas al ensilaje, seguido por países europeos como Alemania y Francia, donde la demanda para la producción de leche ha impulsado su expansión (Yara México, 2024)

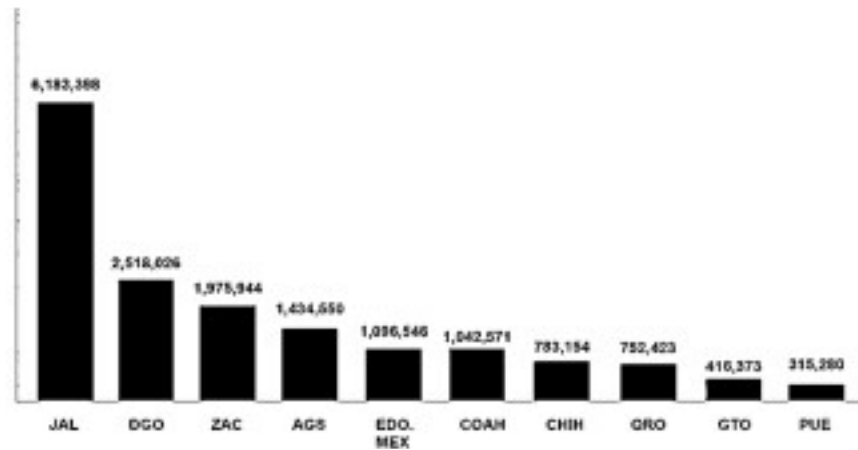
### **2.1.2 Nivel nacional**

En México, el maíz forrajero es esencial para la producción de alimento para ganado, especialmente en sistemas lecheros y de engorda. Puede sembrarse tanto con labranza tradicional como con mínima labranza, lo que permite flexibilidad en diferentes tipos de suelo. La densidad recomendada para este tipo de producción es de 30 a 35 kg de semilla por hectárea, favoreciendo un desarrollo vegetativo abundante.

La producción nacional ha mostrado un crecimiento sostenido. En 2018 superó los 17 millones de toneladas, con una tendencia ascendente desde 2009. El rendimiento promedio nacional alcanzó 29.1 t/ha, derivado de más de 600 mil hectáreas sembradas, donde casi la totalidad de la superficie fue cosechada exitosamente. Los estados con mayor producción incluyen Jalisco, Durango y Zacatecas, reflejando la importancia del maíz forrajero en la ganadería nacional. (InfoAgro, 2021)



**Figura 2.2** Evolución de la producción nacional de maíz forrajero (SIAP, 2019).



**Figura 2.3** Volumen (en toneladas) de las principales entidades productoras del país (SIAP, 2019).

Como se puede observar en la Figura 2.3 Jalisco ocupa el primer lugar como la entidad más productora de maíz dentro del territorio nacional, seguido de Durango y Zacatecas que ocupan el segundo y tercer lugar respectivamente.

En términos económicos, el SIAP reporta que el precio medio por tonelada en 2018 fue de 614 pesos, y aunque la producción nacional cubre la mayoría de la demanda, en ocasiones se realizan importaciones complementarias provenientes principalmente de Estados Unidos. (InfoAgro, 2021)

### **2.1.3 Nivel regional**

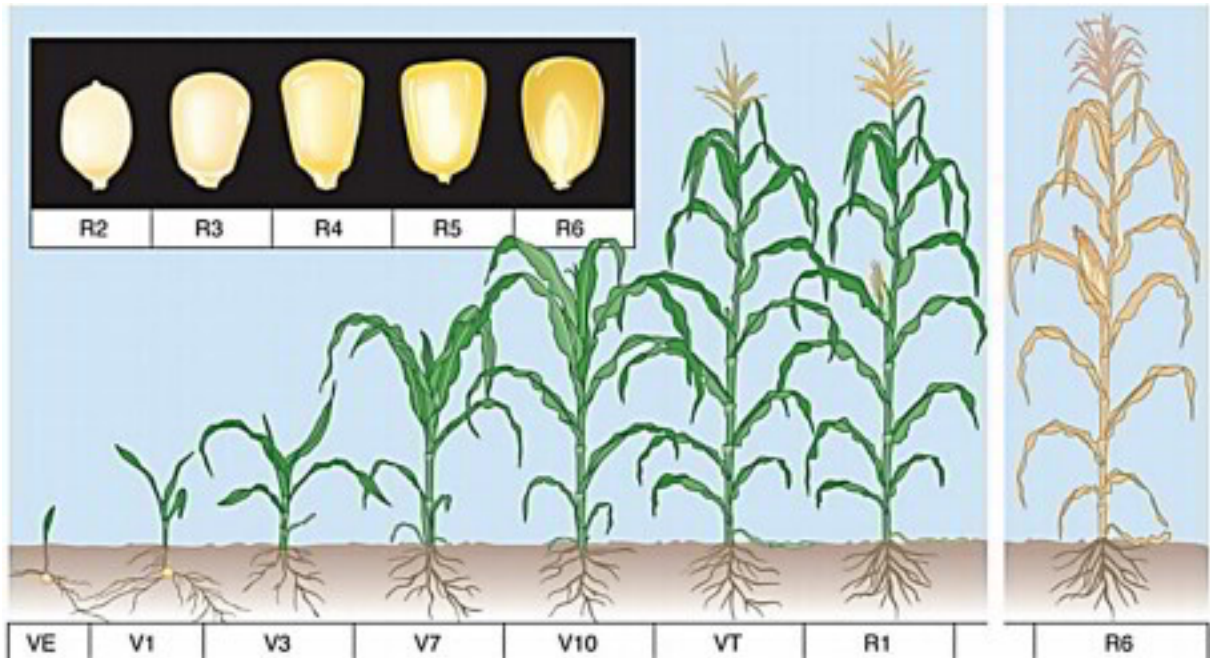
En la Comarca Lagunera, una de las principales cuencas lecheras del país, el maíz forrajero es un cultivo estratégico. Se siembran anualmente alrededor de 15,000 hectáreas, en su mayoría con híbridos comerciales desarrollados para otras regiones. Debido a las condiciones de alta radiación solar, el potencial de rendimiento es elevado, alcanzando hasta 24 t/ha de forraje seco con contenidos de grano entre 45 y 50%.

La región destaca por la eficiencia en la producción forrajera, aunque enfrenta limitaciones hídricas importantes. Por ello, se recomienda utilizar variedades con tolerancia a sequía y realizar un manejo intensivo del agua para optimizar la producción. El ensilaje de maíz continúa siendo una práctica fundamental por su alta calidad nutricional y su capacidad de conservación. (Santos, 2016)

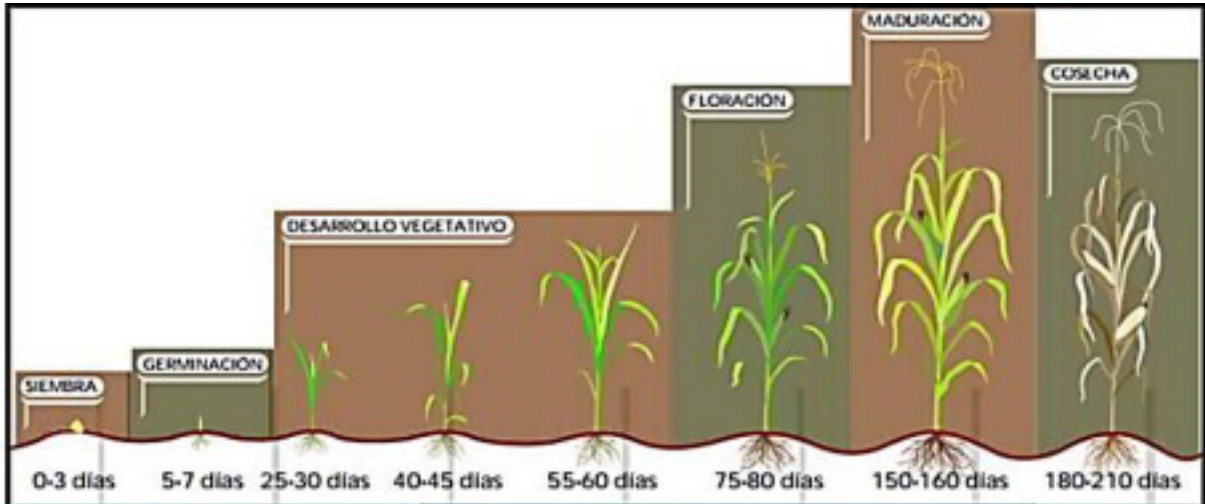
### **2.3 Comportamiento del maíz etapas fenológicas**

El desarrollo fenológico del maíz está determinado por el crecimiento vegetativo y reproductivo, influenciado por factores ambientales como la temperatura, la humedad y la disponibilidad de nutrientes. Según (Intagri, 2024)., la fase vegetativa inicia desde la emergencia y continúa hasta antes de la aparición de la espiga. Durante esta etapa, el cultivo es vulnerable a daños en hojas y raíces, pero también posee una capacidad relativa para recuperarse debido a que la mayor parte de la energía se destina a la formación del follaje.

La fase reproductiva comienza con la aparición de la espiga y se extiende hasta la madurez fisiológica, identificada por la presencia de la capa negra en el punto de inserción del grano. Las condiciones adversas durante esta etapa, como estrés hídrico o ataque de plagas, pueden reducir significativamente el llenado de grano y el rendimiento final, ya que disminuyen el flujo de fotosintatos hacia las mazorcas (Intagri, 2024).



**Figura 2.4** Etapas fenológicas de la fase vegetativa y reproductiva del maíz.



**Figura 2.5** Etapas fenológicas del maíz dividido por días.

## 2.4 Compactación de suelo y como afecta el desarrollo radicular en el maíz

La compactación del suelo es uno de los principales problemas en la agricultura moderna, especialmente por el uso intensivo de maquinaria pesada. Este proceso

reduce la porosidad del suelo, afectando la infiltración de agua, el intercambio gaseoso y la disponibilidad de nutrientes (Agrotey, 2024).

En suelos compactados, las raíces presentan un crecimiento restringido, muchas veces horizontal, lo que limita su capacidad para explorar el suelo y reducir la absorción de agua y nutrientes. Este fenómeno puede disminuir el rendimiento hasta en un 60% dependiendo del grado de compactación. Estudios como el realizado en Paraguay por (Rasche et al., 2020) demuestran que, conforme aumenta la densidad aparente del suelo, el volumen y área de las raíces disminuye notablemente, resaltando la sensibilidad del maíz a condiciones de compactación.

## **2.5 Métodos de muestreos de raíz**

La raíz es fundamental para el crecimiento y la absorción de nutrimentos, por lo que su medición es clave en estudios agronómicos. Según (Fertilab, 2024), el muestreo de raíz incluye seleccionar plantas representativas, extraerlas cuidadosamente, lavar el sistema radicular, conservarlas adecuadamente y realizar mediciones en laboratorio.

El método de planta entera es uno de los más utilizados para estimar la proporción raíz–tallo, ya que permite cuantificar con precisión el peso y volumen de la raíz conectada a la parte aérea. Aunque se pueden perder raíces finas, el método ofrece una buena aproximación de la estructura radicular total y es eficiente en términos de tiempo (Piñeiro & Pinto, 2018).

## **2.6 Métodos de estimación de rendimientos**

La estimación de rendimiento consiste en predecir la producción esperada por hectárea. Para el cultivo de maíz, este proceso incluye el conteo de plantas, el número de mazorcas por planta, el número de granos por mazorca y el peso de 1,000 granos (Calviño, 2023).

Para obtener estimaciones confiables, se recomienda tomar múltiples muestras representativas del lote, especialmente a partir de los estados R4 y R5, donde el

rendimiento tiende a estabilizarse. Estos datos se combinan en fórmulas que permiten extrapolar el rendimiento del área muestreada a toda la superficie sembrada.

## **2.7 Modelos de estimación de rendimiento**

Los modelos de estimación de rendimiento ayudan a proyectar la productividad de un cultivo utilizando variables clave relacionadas con su desarrollo. Estos modelos permiten planificar estrategias de manejo y logística de cosecha. (Vargas et al., 2024).

Entre los métodos más comunes se encuentra la extrapolación del rendimiento a partir del área muestreada, el peso de la biomasa, los componentes del rendimiento y, más recientemente, el uso de sensores y herramientas de agricultura de precisión como el NDVI. Estos modelos simplifican la predicción del rendimiento y ofrecen una aproximación útil para la toma de decisiones en campo.

## **2.8 Agricultura de conservación de suelo**

La agricultura de conservación se basa en tres principios: mínima alteración del suelo, cobertura permanente y diversificación de cultivos (FAO, 2024). Este sistema mejora la eficiencia en el uso del agua, promueve la actividad biológica del suelo y reduce la erosión.

La labranza cero, una de las prácticas más representativas, permite conservar la humedad y reducir el consumo de combustible. El uso de residuos como cobertura ayuda a mantener la estructura del suelo y a enfrentar condiciones climáticas extremas (Donovan, 2023).

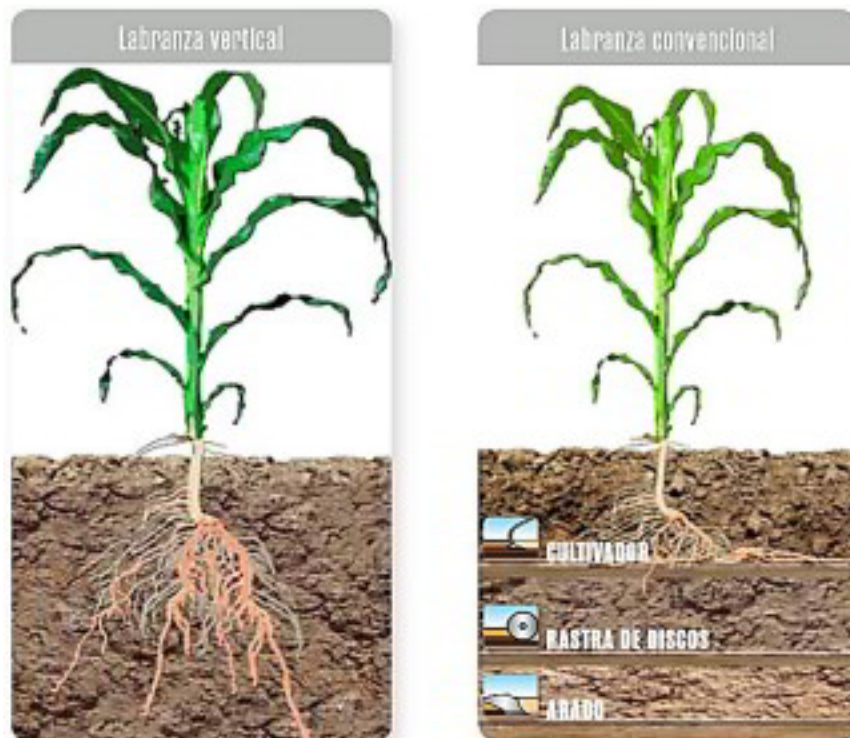
## **2.9 Sistemas de labranza**

### **2.9.1 Labranza tradicional**

La labranza convencional implica el uso de maquinaria para remover el suelo, lo que facilita la preparación de la cama de siembra e incorpora residuos vegetales (JACTO, 2023). Entre sus ventajas se encuentran la aireación y la nivelación del terreno, aunque también presenta desventajas como la erosión, pérdida de humedad y deterioro de la estructura del suelo.

### 2.9.2 Labranza vertical

La labranza vertical busca reducir la compactación al trabajar el suelo en dirección perpendicular a la superficie, lo cual mejora la infiltración de agua y el desarrollo radicular (GreatPlainsInt, s.f.). Este sistema crea un perfil de densidad uniforme que favorece el crecimiento de las raíces y disminuye la formación de capas compactadas. Además, es menos agresivo con el suelo en comparación con la labranza tradicional (LARROSA, 2018).



**Figura 2.6** Comparación labranza vertical contra convencional.

### 2.9.3 Labranza cero

La labranza cero consiste en sembrar sin remover el suelo, utilizando equipos que abren un surco estrecho para depositar la semilla. Esta práctica favorece la conservación del agua y reduce la erosión, aunque puede aumentar el riesgo de compactación si no se maneja adecuadamente (RLC, 2021). La FAO destaca que la cobertura permanente del suelo y la reducción del número de pases de maquinaria

son claves para mantener la salud del suelo y disminuir los costos operativos. (Rodríguez, 2015)

### **2.10 Agroecología**

La agroecología integra prácticas productivas con conocimientos tradicionales para promover sistemas agrícolas sostenibles. Favorece la diversificación de cultivos, la eficiencia en el uso de recursos, el reciclaje de nutrientes y la resiliencia ante el cambio climático (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021).

La FAO identifica diez elementos que fundamentan la agroecología, entre los que se encuentran la diversidad, la creación compartida de conocimiento, las sinergias, la eficiencia y la gobernanza responsable. Este enfoque busca no solo mejorar la producción, sino también fortalecer los medios de vida y preservar los ecosistemas locales.

### **2.11 Antecedentes**

Diversos estudios han desarrollado modelos matemáticos para estimar el rendimiento del maíz, considerando variables como fertilidad del suelo, disponibilidad de nutrientes, condiciones climáticas y manejo agrícola. Voss et al. (1970) identificaron interacciones significativas entre la humedad del suelo, la población de plantas y la fertilización, logrando ajustar un modelo con un  $R^2$  de 0.80 para explicar la variabilidad del rendimiento.

En trabajos más recientes, (Gonzalez, 2020) describe la creación de modelos de predicción basados en características de la mazorca, como el peso, la proporción de olote y el contenido de humedad, obteniendo ajustes superiores a 0.99 en maíces nativos de Tlaxcala. Estos esfuerzos demuestran la importancia de desarrollar modelos específicos para cada zona y variedad, lo cual mejora la precisión en la estimación del rendimiento.

## CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Ubicación y características del experimento

La ubicación del experimento se encuentra en Buenavista, Saltillo Coahuila dentro de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en el campo experimental conocido como “el bajío” en las siguientes coordenadas 25°21'28.33"N, 101° 2'24.71"O. En el cual se aplicaron tres tratamientos (sistema de labranza tradicional (LT), cero (LC) y vertical (LV)) como se observa en la Figura 3.1 y tres repeticiones como bloques. Las variables utilizadas fueron humedad, NDVI y volumen de desarrollo radícula.



**Figura 3.1** Campo experimental; LV; labranza vertical, LC; labranza cero, LT; labranza tradicional.

### 3.2 Planificación de siembra

Para realizar la planificación adecuada de la siembra se consideró la variedad de maíz, Pancho Villa AN-360 debido a que es resistente a las sequías y que se puede adaptar a terrenos pedregosos o de baja fertilidad. (Bacilio, 2023).

Es importante mencionar que se tomó en cuenta iniciar con la siembra el día 5 de julio del 2023, la calibración de la sembradora se realizó mediante la fórmula (1) propuesta por la FAO (FAO, 2001), teniendo como factor adicional el porcentaje de desplazamiento de la rueda motriz de la sembradora, obteniendo la siguiente fórmula:

$$CS = \frac{(OP)(100)}{(\%G - \%D)} \quad (1)$$

Donde:

CS= Calibración de la sembradora

OP= Población de plantas objetivo

%G= Porcentaje de germinación

%D= Porcentaje de desplazamiento de la rueda motriz de la sembradora

Los tratamientos experimentales fueron implementados utilizando un tractor John Deere 6403 TS y tres sistemas de labranza, cuyos implementos se describen a continuación:

- **Labranza Tradicional (LT);** arado de tres discos, rastra y sembradora.
- **Cero;** sembradora.
- **Vertical;** multiarado John Deere, rastra y sembradora.

### 3.3 Recolección de datos

Se realizaron dos recolecciones en diferentes etapas del cultivo la primera fue dentro de la etapa fenológica que se refiere al ritmo de crecimiento vegetativo y reproductivo expresado en función de los cambios morfológicos y fisiológicos de la planta, relacionados con el ambiente (VALLE, 2022).

Se delimita una longitud de 100 cm para la obtención de los datos, en dicha longitud se realiza el muestreo de NDVI con un sensor Green Seeker, se cuantifica el número de plantas emergidas y se elige una planta al azar para tomarla como muestra; el objetivo de esta muestra es observar y medir la raíz de la planta, por lo que cual se debe cuidar la extracción de la misma, una vez obtenido todas las muestras, se trasladan al laboratorio en donde se limpian evitando tener elementos que afecten la medición. Posteriormente, se realizó el pesaje, se registraron los datos correspondientes y se determinó el peso en estado húmedo; se deja secar la raíz una semana aproximadamente para posteriormente realizar el peso en seco. Por lo cual la recolección de cada etapa arrojó 27 muestras diferentes registradas en una base de datos en Excel el cual se muestra en el anexo Tabla 3.1 y 3.2, teniendo estos datos se procede a realizar cálculos de peso total de las plantas en 1 m.

### 3.4 Análisis de datos

Para el análisis de los datos tomados, realizaremos un diseño experimental completamente al azar, donde se analizará el rendimiento de plantas, el desarrollo radicular y el NDVI.

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

Donde

$Y_{ij}$  = Variable aleatoria observable del  $i$  – ésimo tratamiento y la  $j$  – ésima repetición.

$\mu$  = Escala que representa la población promedio

$\tau_i$  = Efecto del  $i$  – ésimo tratamiento

$\beta_j$  = Efecto del  $j$  – ésimo bloque

$\varepsilon_{ij}$ =Componente aleatoria de errores

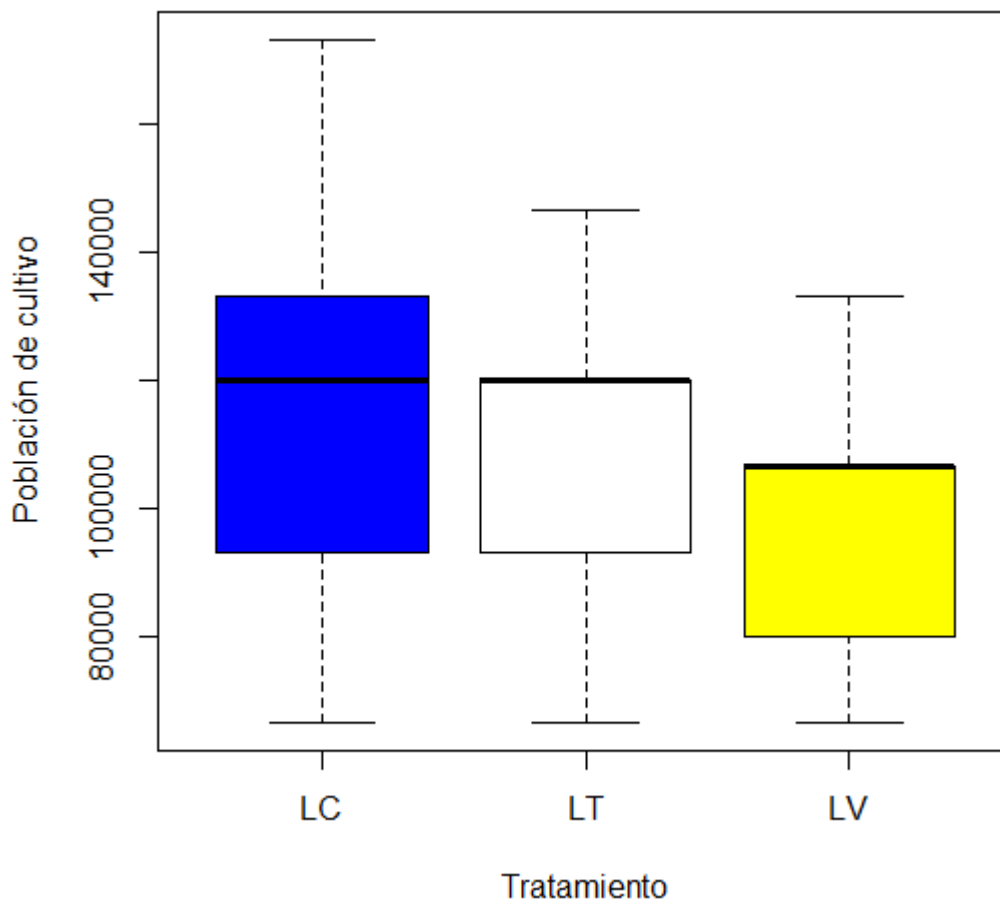
Se realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para verificar si los datos se ajustan a una distribución normal, el p-valor resultante de esta prueba se comparó con un nivel de significancia de 0.05 para determinar si se rechaza o no la hipótesis nula de normalidad; se generan histogramas para visualizar la distribución de la variable de interés.

Realizando lo anteriormente mencionado utilizaremos un análisis de varianza (ANOVA) para examinar las diferencias en las medias, utilizando la comparación múltiple de medias mediante la prueba de Tukey, de la cual obtendremos una representación de comparación en gráficos para un mejor análisis.

## CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Germinación y emergencia

La variedad Pancho Villa AN-360 cuenta con un 85% de germinación y se calibró la sembradora a 121,000 de semillas por hectárea para la obtención de 100,000 plantas. La población promedio del cultivo por tratamiento fue de LC 118,516; LT 108,145 y LV 97,775 semillas por hectárea como se aprecia en la Figura 4.1 al compartir la desviación esto indica que estadísticamente son iguales, aproximándose a la población esperada la labranza vertical. Blanco y González (2021) obtuvieron mayores rendimientos al aumentar la densidad de población con el híbrido HST-3235.

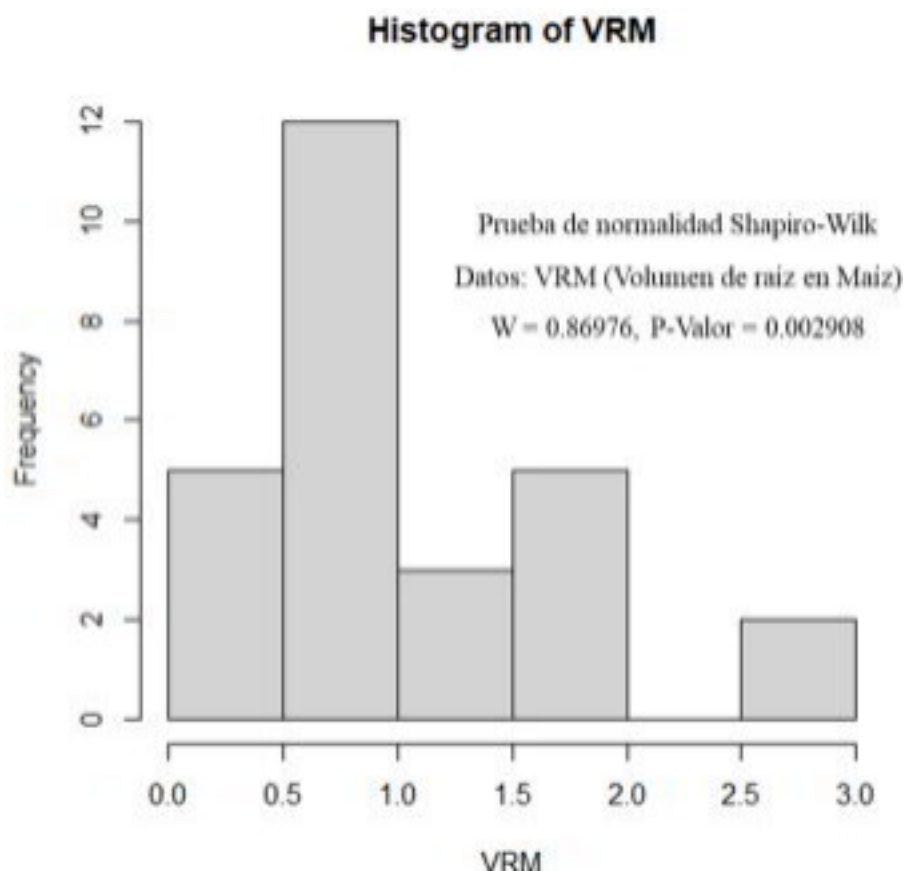


**Figura 4.1** Diagrama de cajas de la población del cultivo.

La recolección de datos para el desarrollo radicular consistió en dos etapas como se describe en la metodología a continuación se muestran los resultados.

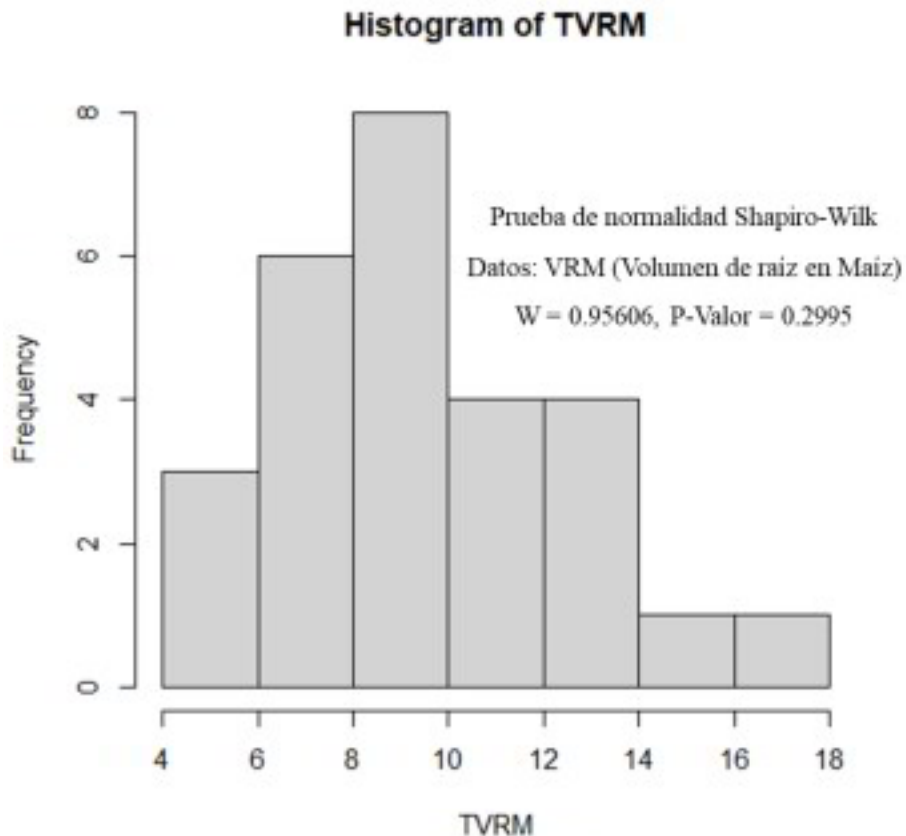
#### 4.2 Efectos de sistemas de labranza en el volumen de desarrollo radicular primera etapa

Como se observa en la Figura 4.2, los datos no siguen una distribución normal. Esto se confirma con la prueba de Shapiro-Wilk, cuyo p-valor ( $<0.05$ ) permite rechazar la hipótesis nula de normalidad.



**Figura 4.2** Histograma y prueba de Shapiro-Wilk de los datos de la primera etapa.

Aplicando la transformación de datos descrita en la metodología se comprueba por medio de la gráfica presentada en la Figura 4.3, observando el ajuste de los datos además que prueba de Shapiro-Wilk ya es superior de 0.05 por lo tanto se acepta la hipótesis que los datos son normales.



**Figura 4.3** Histograma y prueba de Shapiro-Wilk con datos transformados.

A continuación, se presentan el diseño experimental de los bloques de los datos de la primera etapa Tabla 4.1.

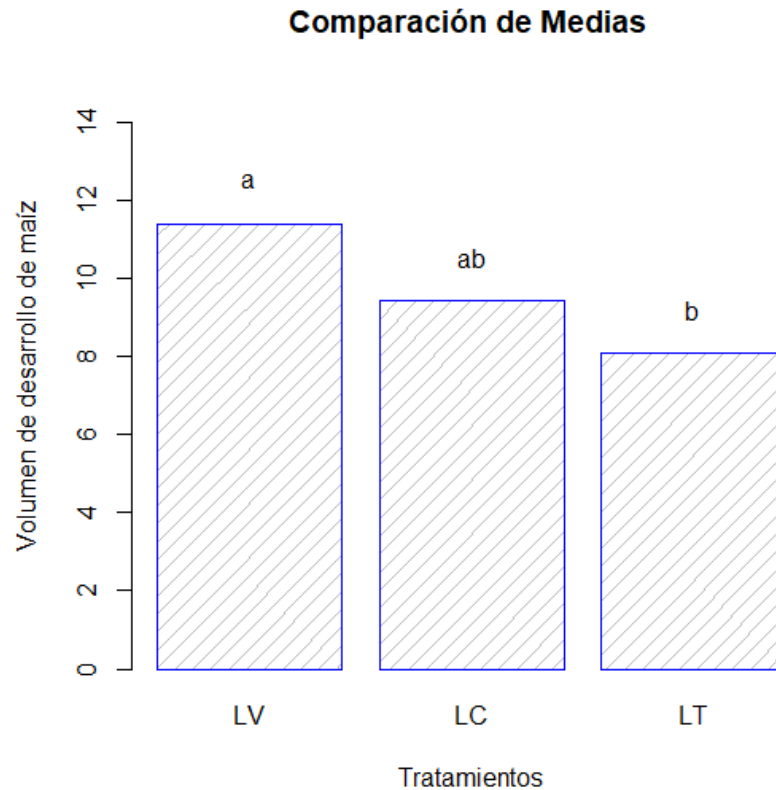
**Tabla 4.1** Análisis de varianza de datos transformados de la primera etapa.

Respuesta: TVRM (Datos transformados de Volumen de raíz en Maíz)					
	Df	Suma Sq.	Media Sq.	Valor F	Pr(>F)
Reps	2	13.427	6.7133	0.8861	0.42646
Tratamiento	2	50.197	25.0983	3.3128	0.05525.
Residuales	22	166.675	7.5761		

Código de Significancia: 0, \*\*\*\* 0.001, \*\*\* 0.01, \*\* 0.05, . 0.1, ' 1

Observando en la Tabla 4.1, el análisis de varianza indica que existe una diferencia significativa entre los tratamientos ( $p < 0.05$ ), realizando la comparación múltiple de media como se observa en la Figura 4.4 donde a, ab y b representa cada grupo. Teniendo unas medias de LV 11.396; LC 9.415 y LT 8.076, indicando que entre LV y LT es donde existen la diferencia debido a que se presenta mayor desarrollo radicular

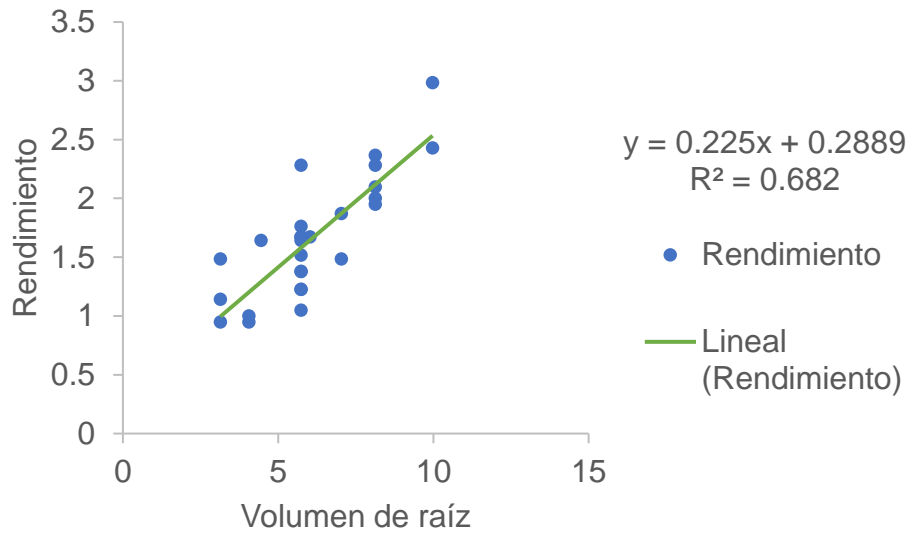
en LV y LC pertenece a los dos grupos lo cual representa que no existe diferencia en este tratamiento.



**Figura 4.4** Gráfica de comparación de medias.

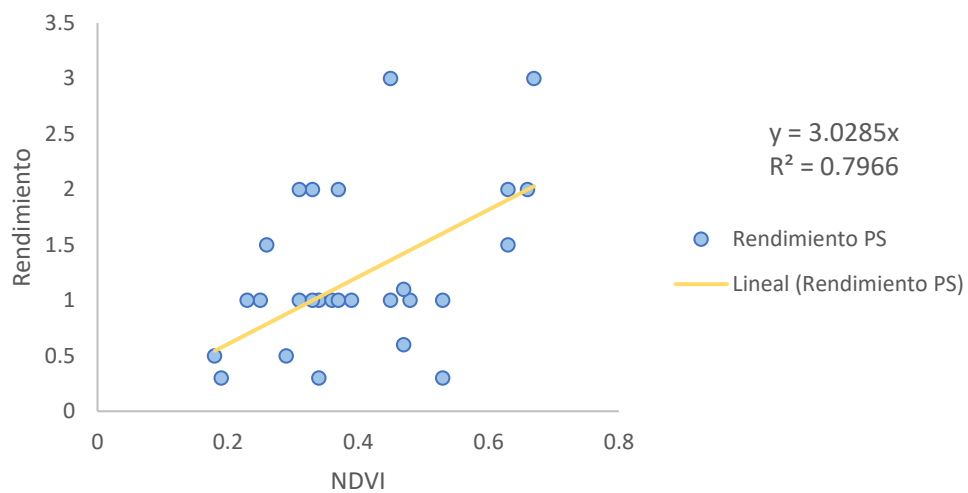
Por lo tanto, se concluye que para los datos de la primera etapa tuvo mejor desarrollo radicular la LV.

En la siguiente gráfica perteneciente a la Figura 4.5 se puede observar la tendencia en peso seco y desarrollo radicular del cultivo. El modelo indica que mediante el conocimiento del volumen de raíz se puede predecir el rendimiento en un 68.2%, además indica una correlación de Pearson de las variables del 82.6%. Es importante mencionar que los datos fueron transformados debido a que no cumplían con la normalidad como se comprueba anteriormente.



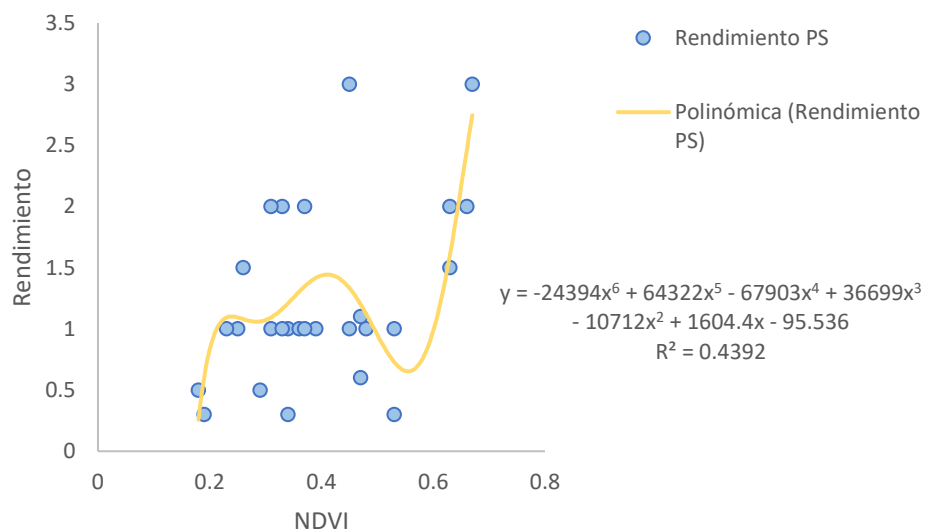
**Figura 4.5** Modelo de predicción de rendimiento a base de volumen de raíz del cultivo.

Por otro lado, el índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI por sus siglas en inglés) no se encontró diferencia significativa en los tratamientos por lo tanto en la Figura 4.6 se observa el modelo que explica rendimiento a base de NDVI. Observando que el modelo predice el rendimiento con 0.7966 de confianza, aclarando que el intercepto parte de 0,0 debido a que si no hay cultivo no hay rendimiento y el índice es cero, la correlación de Pearson para estas variables en la condición que menciona es de 0.45531.



**Figura 4.6** Modelo de predicción de rendimiento a base de NDVI.

En la Figura 4.6 podemos observar que los datos se encuentran dispersos y alejados a la línea de tendencia esperada, por lo cual se optó realizar un gráfico, pero con una tendencia polinomial grado 6, como se puede observar en la Figura 4.7, el modelo tiene una confianza de predicción de 0.4392, este es menor a diferencia de la Figura 4.6 debido a la dispersión de los datos, con una relación de Pearson de 0.45531; a diferencia del grafico anterior los datos se encuentran más cercanos al rendimiento; aquellos datos que están alejados se debe a que el lugar de muestreo aun no existía un desarrollo de vegetación o muy poco desarrollo.



**Figura 4.7** Modelo de predicción de rendimiento a base de NDVI.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

A partir de los resultados obtenidos, se evidencia un desarrollo radicular superior en la labranza vertical (LV). Considerando este aspecto, el sistema de LV se posiciona como la opción óptima para su implementación, ya que no solo representa un menor gasto económico, sino que, estadísticamente, ha demostrado ser el tratamiento más eficiente. Por ello, se presenta como una alternativa viable para su adopción por parte de los productores.

Asimismo, se desarrolló un modelo de predicción de rendimiento basado en el volumen radicular, con una precisión del 0.682. Este modelo se presenta como una alternativa viable para estimar el rendimiento total de la siembra. Además, su aplicación en combinación con la labranza vertical, que ha demostrado favorecer un mejor desarrollo radicular, refuerza su utilidad para optimizar los resultados productivos.

Conforme en los resultados obtenidos, se recomienda considerar el volumen de raíz como un parámetro para predecir el rendimiento del cultivo, esto debido a la relación observada entre un mayor desarrollo radicular y una producción elevada.

Se recomienda que futuras investigaciones repliquen este estudio en distintos ciclos agrícolas, variedades de maíz, incorporando además otros índices de vegetación y un mayor número de repeticiones experimentales. Esto permitirá validar la precisión del modelo y ampliar su alcance en el ámbito científico. Se sugiere a los productores considerar la labranza vertical como una alternativa viable, ya que favorece un mejor desarrollo radicular y reduce costos operativos. Asimismo, el uso de herramientas de agricultura de precisión como el NDVI puede apoyar la toma de decisiones para mejorar el rendimiento de sus cultivos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrotey*. (24 de Mayo de 2024). <https://www.agrotey.com.mx/como-afecta-la-compactacion-del-suelo-a-la-agricultura/>
- Bacilio, M. C. (2023). *Semillas de vida*. Semillas de vida: <https://semillasdevida.org.mx/maiz-chaparro-o-enano/>
- Calviño, F. (28 de Agosto de 2023). Estimación de rendimiento de maíz <https://blog.sima.ag/2023/estimacion-de-rendimiento-en-maiz/>
- conahcyt*. (s.f.). conahcyt: <https://conahcyt.mx/cibiogem/index.php/maiz>
- Donovan, M. (23 de Enero de 2023). *CIMMYT*. <https://www.cimmyt.org/es/noticias/que-es-la-agricultura-de-conservacion/>
- FAO. (s.f.). <https://www.fao.org/4/x7650s/x7650s02.htm>
- FAO. (2001). <https://www.fao.org/3/X8234S/x8234s09.htm>
- FAO. (2024). <https://www.fao.org/conservation-agriculture/es/>
- FERTILAB*. (s.f.).
- Gonzalez, F. R. (2020). *modelo para la prediccion de rendimiento de grano en maiz*. Texcoco.
- GreatPlainsInt*. (s.f.).
- Hernández Alonso, E. y. (07 de Julio de 2021). *INIFAP*. INIFAP: <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2943>
- InfoAgro*. (08 de Febrero de 2021). <https://mexico.infoagro.com/maiz-forrajero-en-mexico/>
- Intagri*. (s.f.).
- JACTO*. (22 de Julio de 2023). <https://bloglatam.jacto.com/tipos-de-labranza/>
- LARROSA*. (12 de Septiembre de 2018). <https://www.larrosa-arnal.com/blog/cuales-son-las-principales-caracteristicas-de-la-labranza-vertical/>
- Mark. (2024). *Corteva agriscience*. <https://www.corteva.es/agronomia-y-servicios/informacion-agronomica/compactacion-del-suelo-en-la-produccion-agricola.html>
- MER, H. (2006). *Herbario MER*. Herbario MER: <http://www.forest.ula.ve/herbariomer/estudiantes6.htm>

- Mordor Intelligence* . (s.f.). <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/maize-market>
- NETAFIM*. (2024). <https://www.netafim.com.mx/blog/agricultura-de-precision-la-era-del-exito-agroalimentario/>
- Paquete tecnologico del maíz*. (s.f.). <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Paquetes2012/151.pdf>
- Piñeiro, & Pinto. (16 de Mayo de 2018). <http://cultivosdeservicios.agro.uba.ar/muestreo-de-raices-metodo-de-planta-entera/>
- Ramírez et al. (2017). *Estimación de rendimiento de variedades nativas de maíz en el*. Estimación de rendimiento de variedades nativas de maíz en el: [https://www.researchgate.net/publication/322517608\\_Estimacion\\_de\\_rendimiento\\_de\\_variedades\\_nativas\\_de\\_maiz\\_en\\_el\\_estado\\_de\\_Tlaxcala](https://www.researchgate.net/publication/322517608_Estimacion_de_rendimiento_de_variedades_nativas_de_maiz_en_el_estado_de_Tlaxcala)
- Rasche et al. (9 de Marzo de 2020). <http://scielo.iics.una.py/pdf/ia/v22n1/2305-0683-ia-22-01-13.pdf>
- Reynolds et al. (Agosto de 2020). *Inifap*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/CD006307.pdf>
- Rincón et al. (2010). [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232250/Diversidad\\_y\\_distribucion\\_de\\_maices\\_nativos\\_en\\_coahuila\\_mexico.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232250/Diversidad_y_distribucion_de_maices_nativos_en_coahuila_mexico.pdf)
- RLC, T. R. (2021). *Plataforma de conocimientos sobre agricultura familiar*. Cero labranza: <https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/1618078/>
- Rodriguez. (2 de Abril de 2015). *Los sistemas de labranza y su influencia en las propiedades físicas del suelo Revista Ingeniería Agrícola*,. Los sistemas de labranza y su influencia en las propiedades físicas del suelo Revista Ingeniería Agrícola,: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://www.redalyc.org/pdf/5862/586261425010.pdf>
- Santos, I. D. (12 de Marzo de 2016). <https://es.scribd.com/document/304038608/Produccion-de-maiz-forrajero-en-La-Comarca-Lagunera>
- Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural . (sf). *tamaulipas.gob*. [tamaulipas.gob.: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.tamaulipas.gob.mx/campo/wp-content/uploads/sites/40/2019/09/maiz-forrajero.pdf](https://www.tamaulipas.gob.mx/campo/wp-content/uploads/sites/40/2019/09/maiz-forrajero.pdf)

- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.* (22 de Abril de 2021).  
<https://www.gob.mx/agricultura/articulos/la-agroecologia-es-el-presente-para-el-campo?idiom=es>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.* (14 de Abril de 2023).  
<https://www.gob.mx/agricultura/articulos/sabes-que-es-la-agroecologia>
- Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. (s.f.). *Ma\_zForrajero\_monografias*.  
Ma\_zForrajero\_monografias: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/96272/Ma\\_zForrajero\\_monografias.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/96272/Ma_zForrajero_monografias.pdf)
- SIAP.* (Marzo de 2021).  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/622613/Balanza\\_disponibilidad-consumo\\_6.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/622613/Balanza_disponibilidad-consumo_6.pdf)
- VALLE, S. (12 de mayo de 2022). *SEMILLAS VALLE. SEMILLAS VALLE:*  
<https://semillasvalle.com/site/blog/fenologia-y-fisiologia-en-cultivos-de-maiz/#:~:text=El%20desarrollo%20fenol%C3%B3gico%20del%20ma%C3%A1z,planta%2C%20relacionados%20con%20el%20ambiente.>
- Vargas et al. (sf). *Introducción a la agricultura de precisión 4.0 en huertos de arándanos.* <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/d5766e51-6f15-4a18-a943-ab37996e8195/content>
- Yara México.* (s.f.). <https://www.yara.com.mx/nutricion-vegetal/maiz/produccion-mundial/>

## ANEXOS

**Tabla 3.1.** Recolección de datos de siembra

<b>Prueba no. 1</b>							
Tipo de labranza	Repetición	Muestra	Número de plantas	NDVI	Peso en húmedo(g)	Peso en seco (g)	Volumen (ml)
LT	R1	M1	10	0.66	11.4	3.8	2
LT	R1	M2	8	0.53	4.8	1.9	1
LT	R1	M3	7	0.63	10.3	2.2	1.5
LT	R2	M1	9	0.33	18.2	4	2
LT	R2	M2	5	0.25	4.6	1.1	1
LT	R2	M3	5	0.23	6.9	1.5	1
LT	R3	M1	9	0.29	4.8	0.9	0.5
LT	R3	M2	11	0.31	7.2	1.5	1
LT	R3	M3	9	0.34	7.4	1.9	1
LC	R1	M1	9	0.53	4.3	0.9	0.3
LC	R1	M2	10	0.48	14	2.7	1
LC	R1	M3	8	0.36	11.9	2.8	1
LC	R2	M1	9	0.18	4.6	1	0.5
LC	R2	M2	13	0.34	6.6	1.3	0.3
LC	R2	M3	5	0.39	12	3.1	1
LC	R3	M1	6	0.45	32.4	8.9	3
LC	R3	M2	13	0.26	16.1	3.5	1.5
LC	R3	M3	7	0.47	13.3	2.8	1.1
LV	R1	M1	7	0.45	11	2.8	1
LV	R1	M2	5	0.63	23.5	5.2	2
LV	R1	M3	5	0.67	25	5.9	3
LV	R2	M1	9	0.19	8.5	2.2	0.3
LV	R2	M2	6	0.31	22.6	5.6	2
LV	R2	M3	8	0.33	10.1	2.3	1
LV	R3	M1	8	0.47	16	2.7	0.6
LV	R3	M2	8	0.37	19.1	5.2	1
LV	R3	M3	10	0.37	21.5	4.4	2

**Tabla 3.2.** Recolección de datos de siembra

<b>Prueba no.2</b>							
Tipo de labranza	Repetición	Muestra	Número de plantas	NDVI	Peso en húmedo (g)	Peso en seco(g)	Volumen (ml)
LT	R1	M1	9	0.51	84	5	1
LT	R1	M2	8	0.51	60	20	10
LT	R1	M3	12	0.55	77	9	3.2
LT	R2	M1	5	0.57	220	37	7
LT	R2	M2	8	0.25	134	33	8
LT	R2	M3	8	0.57	124	20	3.9
LT	R3	M1	9	0.6	13	9	2.9
LT	R3	M2	8	0.74	21	3	1.1
LT	R3	M3	9	0.61	44	5.4	10
LC	R1	M1	9	0.41	5	3.4	10
LC	R1	M2	9	0.34	20	4	3
LC	R1	M3	8	0.5	80	5	1
LC	R2	M1	8	0.48	23	3	1
LC	R2	M2	7	0.32	22	1	1
LC	R2	M3	10	0.52	70	6	2
LC	R3	M1	7	0.35	19	5	1
LC	R3	M2	8	0.37	230	15	4.5
LC	R3	M3	9	0.44	33	19	6
LV	R1	M1	10	0.39	67	18	10
LV	R1	M2	5	0.54	309	49	10
LV	R1	M3	8	0.65	233	47	10
LV	R2	M1	7	0.43	370	8	2.9
LV	R2	M2	5	0.42	265	67	15
LV	R2	M3	8	0.61	98	18	4
LV	R3	M1	11	0.4	255	56	12
LV	R3	M2	10	0.43	137	62	18
LV	R3	M3	8	0.65	256	15	5