

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



CARBÓN LIGNITO ADICIONADO A MEZCLAS FÍSICAS DE FERTILIZANTES  
PARA INCREMENTAR SU EFICIENCIA Y APROVECHAMIENTO POR EL  
CULTIVO DE PAPA

**Tesis**

Que presenta HÉCTOR MANUEL CASTILLO SOTO  
Como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

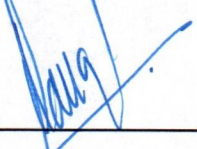
Saltillo, Coahuila

Noviembre 2025

CARBÓN LIGNITO ADICIONADO A MEZCLAS FÍSICAS DE FERTILIZANTES  
PARA INCREMENTAR SU EFICIENCIA Y APROVECHAMIENTO POR EL  
CULTIVO DE PAPA

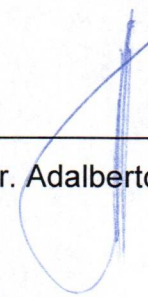
**Tesis**

Elaborada por HÉCTOR MANUEL CASTILLO SOTO como requisito parcial  
para obtener el grado de Maestro En Ciencias En Horticultura con la supervisión  
y aprobación del Comité de Asesoría




---

Dr. Alberto Sandoval Rangel  
Director de Tesis



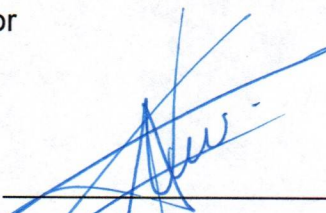
---

Dr. Adalberto Benavides Mendoza  
Asesor




---

Dr. Marcelino Cabrera de la Fuente  
Asesor



---

Dr. Neymar Camposeco Montejó  
Asesor



---

Dr. Antonio Flores Naveda  
Subdirector de Postgrado  
UAAAN

## **AGRADECIMIENTOS**

**A Dios:** Por la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa. Sin Su guía, este logro no habría sido posible.

**A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro:** Mi Alma Terra Mater por ser una gran casa de estudios y un espacio que me brindó formación, conocimiento y sentido de pertenencia. Gracias por inculcar en sus profesionistas los valores de sencillez, humildad y compromiso con el campo. Es un honor haber sido parte de esta institución y llevar con orgullo su nombre en mi vida profesional.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. José Emilio Cárdenas Dávila y a todo el personal de la **Agrícola MAEVA S.P.R. de R.L.** por su invaluable apoyo durante el desarrollo de esta investigación. Su colaboración en campo y disposición para brindar ayuda en cada labor agrícola fueron fundamentales para la realización de este trabajo. Gracias por compartir su tiempo, conocimientos y experiencia, los cuales contribuyeron significativamente al cumplimiento de los objetivos planteados.

A la **Minería y Energía del Noreste S.A.** por su colaboración y apoyo al facilitar el carbón lignito empleado en esta investigación. Su contribución fue esencial para el desarrollo del trabajo experimental y para el logro de los objetivos planteados.

A la empresa **KESWICK S.A. de C.V.** especialmente **Al MC. Genaro Arturo Rodríguez de la Colina:** Por darme la oportunidad de iniciar mi trayectoria profesional en sus instalaciones. Su confianza y apoyo fueron fundamentales para fortalecer mi formación y mi compromiso con la agricultura.

**Al Dr. Leobardo Bañuelos Herrera:** Por el conocimiento, apoyo para la realización de este proyecto de investigación, por brindarme su amistad y sus consejos “Gracias”.

**A la Dra. Lucia Marcial Salvador:** Por su invaluable apoyo y orientación durante el proceso de redacción de esta tesis.

**Al Dr. Isaac Guajardo Paz:** Por su apoyo y orientación durante el proceso de redacción de esta tesis.

**A la Ing. Cleotilde Hernández Matías:** Por su amistad, el apoyo y asesoramiento para la realización de este trabajo.

**A los ingenieros Axel Hernández Cruz y Alfredo Gutiérrez Cerón** por su apoyo incondicional y colaboración durante el trabajo de campo. Agradezco su tiempo, esfuerzo y compañerismo, que hicieron de esta experiencia un proceso más enriquecedor y humano.

**A la Dra. Eneida Pérez Velazco:** Por su apoyo y acompañamiento en éste proceso.

Agradezco la confianza, apoyo y dedicación de tiempo a mis asesores: **Dr. Alberto Sandoval Rangel, Dr. Adalberto Benavides Mendoza, Dr. Marcelino Cabrera de la Fuente, Dr. Neymar Camposeco Montejo.** Por haber compartido conmigo sus conocimientos y apoyarme en cada momento de este proyecto.

**A mis amigos y compañeros de generación:** MC. Karina Margarita de los Santos Vázquez, MC. Alejandra, Sánchez Reyna, MC. Gabriel Alberto Barrios López, Ing. Juan Pablo Collazo Gámez por brindarme su confianza y amistad y apoyo.

## DEDICATORIAS

**A mis padres:** Prospero Castillo Martínez, María Cristina Soto Monclut. Aunque ya no están físicamente conmigo, su amor, esfuerzo y enseñanzas han sido la base de todo lo que soy y de cada paso que he dado. Este logro también es de ustedes. Gracias por creer en mí desde siempre, por su sacrificio silencioso y por el ejemplo de dignidad y fortaleza que me dejaron como legado. Con todo mi amor, esta tesis va dedicada a ustedes.

**A mi abuela:** María Martínez Bonilla por su amor incondicional y su presencia constante en mi vida. Gracias por cada consejo, cada gesto de cariño y por enseñarme, con su ejemplo, el valor de la fortaleza y la bondad. Le agradezco eternamente por haber sido mi guía, mi refugio y una de las mayores inspiraciones de mi vida.

**A mis hermanos:** Isela María, Cristina Judith, Ing. Cesar Heberto y Ada Laura por creer en mí, porque siempre han estado en las buenas y malas, por los buenos y malos momentos que hemos pasado, por la comprensión, confianza y apoyo incomparable que me han brindado y que me brindan día con día “Los amo”.

**A mi esposa:** María del Carmen Martínez Alvarado gracias por ser parte fundamental de mi vida, por tu amor firme y constante, por acompañarme en cada paso de este camino y por tu paciencia inagotable en los momentos más exigentes. Este logro también es tuyo, fruto de tu apoyo y de tu presencia incondicional.

**A mis hijos:** Andoni Castillo Serapio, Ing. Héctor Alexis Castillo Martínez y André Sebastián Castillo Martínez cuya presencia ha sido una fuente inagotable de inspiración, amor y fortaleza. Ustedes han dado sentido y motivo a cada esfuerzo, y su alegría ha sido el impulso que me acompañó en los momentos

más desafiantes. Este logro también les pertenece, porque sin ustedes este camino no habría tenido el mismo significado.

**A la persona que soy y a la que fui, por no rendirme,** hoy celebro cada paso, cada caída, cada despertar, porque he comprendido que el crecimiento no tiene edad, ni los sueños tienen límite cuando se siembran desde el alma, esta tesis no es solo un logro académico, es un acto de amor propio, una victoria espiritual, un recordatorio de que estoy aquí viviendo mi propósito.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	iii
DEDICATORIAS .....	v
RESUMEN .....	xii
ABSTRACT .....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivo .....	2
Hipótesis.....	2
REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
Los Fertilizantes .....	3
Eficiencia de los Fertilizantes .....	3
Estimulación .....	4
El Carbón Mineral.....	4
Concepto y Características .....	4
Características Particulares de los Residuos de Carbón Mineral .....	6
El Carbón Lignito.....	6
Beneficios del Lignito en el Suelo y la Nutrición Vegetal.....	6
Generalidades del Cultivo de la Papa.....	7
Origen.....	7
Morfología y Ciclo de Vida.....	8
Usos de la Papa .....	9
Alimenticios.....	9
Industriales.....	9
Requerimientos Agroclimáticos .....	10
Manejo Agronómico del Cultivo de la Papa.....	10
Condiciones de Almacenamiento de los Tubérculos de Papa .....	10
Preparación del Suelo y Siembra .....	11
Riego.....	11
Nutrición y Fertilización .....	12

Formas de Fertilización .....	14
Variedades de Papa de Interés Agronómico .....	15
Plagas y Enfermedades del Cultivo de la Papa.....	16
Principales enfermedades relacionadas a la nutrición .....	16
MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
Descripción del Sitio Experimental .....	19
Localización.....	19
Descripción de Tratamientos .....	19
Obtención del Carbón Lignito .....	20
Obtención de la Semilla de Papa .....	21
Preparación de las Mezclas Físicas de Fertilizantes Base y Adición del Carbón Lignito. ....	22
Muestreo del Suelo y Agua.....	22
Aplicación de los Tratamientos.....	23
Cosecha .....	25
Variables Evaluadas.....	25
En la Planta .....	25
Contenido de Minerales en los tubérculos.....	26
Análisis de Datos.....	27
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	28
Efecto del Carbón Lignito en el Suelo.....	28
Macroelementos.....	30
Microelementos .....	30
Efecto del Carbón Lignito Sobre las Variables de Crecimiento de la Papa .	31
Contenido de minerales en las hojas de papa.....	35
Macroelementos.....	35
Microelementos .....	36
Contenido de Minerales en los tubérculos de papa.....	37
Porcentaje de freído en las papas.....	41
Análisis de ahorro en costos .....	42

CONCLUSIONES .....	45
REFERENCIAS .....	46
ANEXOS .....	57
Anexo 1. Análisis del carbón lignito .....	57
Anexo 2. Análisis del suelo antes de la siembra.....	58
Anexo 3. Análisis del suelo después de la siembra.....	60
Anexo 4. Análisis del agua .....	66

## LISTA DE CUADROS

<i>Cuadro 1. Descripción de los tratamientos</i> -----	20
<i>Cuadro 2. Fertilizantes utilizados para la elaboración de la mezcla física de fertilizantes base calculada para el cultivo de papa</i> -----	22
<i>Cuadro 3 Programa de aplicaciones agrícolas</i> -----	24
<i>Cuadro 4. Efecto del Carbón Lignito en el Suelo</i> -----	29
<i>Cuadro 5. Efecto del Carbón Lignito y la reducción de fertilizantes sobre el contenido de macro y micro elementos en el suelo</i> -----	31
<i>Cuadro 6. Efecto del carbón lignito adicionado a las mezclas físicas de fertilizantes base sobre el crecimiento de la planta de papa.</i> -----	32
<i>Cuadro 7. Efecto del carbón lignito adicionado a las mezclas físicas de fertilizantes base sobre el rendimiento de papa</i> -----	34
<i>Cuadro 8. Efecto de los tratamientos sobre el contenido de macronutrientes en los tubérculos</i> -----	39
<i>Cuadro 9. Efecto de los tratamientos sobre el contenido de micronutrientes en los tubérculos</i> -----	39
<i>Cuadro 10. Análisis de correlación de Spearman entre las variables agronómicas, rendimiento y minerales en hojas y tubérculos</i> -----	41
<i>Cuadro 11. Porcentaje de freído en las papas</i> -----	42
<i>Cuadro 12. Inversión realizada para cada tratamiento</i> -----	44

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Principales cuencas carboníferas en México</i> -----	5
<i>Figura 2. Localización del área de estudio en Galeana, Nuevo León</i> -----	19
<i>Figura 3. Minas de donde proviene el carbón lignito</i> -----	21
<i>Figura 4. Aplicación de los tratamientos</i> -----	23
<i>Figura 5 a) Contenido de macronutrientes y b) contenido de micronutrientes en las hojas del cultivo de papa</i> -----	37

## RESUMEN

APLICACIÓN DEL CARBÓN LIGNITO A MEZCLAS FÍSICAS DE  
FERTILIZANTES PARA INCREMENTAR SU EFICIENCIA Y  
APROVECHAMIENTO EN EL CULTIVO DE PAPA

Por

HÉCTOR MANUEL CASTILLO SOTO  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DR. ALBERTO SANDOVAL RANGEL  
-ASESOR-

Saltillo, Coahuila

Noviembre 2025

El uso intensivo de fertilizantes químicos en la agricultura ha llevado al deterioro progresivo de los suelos, afectando su estructura, biodiversidad y capacidad productiva: fenómeno particularmente preocupante en cultivos intensivos como el de la papa, por su alta demanda en nutrientes. El objetivo de este trabajo fue evaluar la adición de carbón lignito con diferentes porcentajes de fertilización base, para aumentar su eficiencia y aprovechamiento en el cultivo de papa. El estudio se estableció en Galeana, Nuevo León, México. La papa fue sembrada a campo abierto y riego por goteo, bajo un esquema de manejo tradicional en la región. Se evaluaron cinco porcentajes de una mezcla de fertilizante comercial, 100, 90, 80, 70 y 60% adicionadas cada una con una dosis de 597 kg ha<sup>-1</sup> de carbón lignito, y como control la mezcla comercial al 100% sin carbón lignito. Cada tratamiento se evaluó en tres repeticiones, en un diseño de bloques completos al azar. Cada repetición constó de cuatro surcos de 157 m de largo a una separación de 0.9 m. Los resultados obtenidos en este estudio, muestran que la adición de 597 kg ha<sup>-1</sup> de carbón lignito a las mezclas físicas de fertilizante aumentó la eficiencia y aprovechamiento de los fertilizantes aplicados, considerando que el crecimiento, la productividad y la calidad del cultivo de papa fue similar en las dosis de fertilización química al 60-70%. Adicionalmente, se observaron mejoras en las propiedades del suelo, como el aumento en la retención de humedad en un 27.1% y sostenimiento del contenido de materia orgánica. Además, el uso de carbón lignito es una opción económicamente viable ya que redujo los costos de fertilización en este estudio hasta un 32.2%. En conjunto, la integración del carbón lignito como enmienda representa una estrategia sustentable y rentable, que optimiza la eficiencia de los fertilizantes, promueve la salud del suelo, y contribuye a una agricultura más responsable con el ambiente.

**Palabras clave:** Fertilización, Uso eficiente, Producción sostenible.

## **ABSTRACT**

APPLICATION OF LIGNITE COAL TO PHYSICAL FERTILIZER BLENDS TO  
INCREASE THEIR EFFICIENCY AND UTILIZATION IN THE POTATO CROP

By

HÉCTOR MANUEL CASTILLO SOTO  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ALBERTO SANDOVAL RANGER -ADVISOR-

Saltillo, Coahuila

November 2025

The intensive use of chemical fertilizers in agriculture has led to the progressive deterioration of soils, affecting their structure, biodiversity, and productive capacity: a phenomenon of particular concern in intensive crops such as potato, due to its high nutrient demand. The objective of this study was to evaluate the addition of lignite coal with different percentages of base fertilization to increase its efficiency and use in potato cultivation. The study was conducted in Galeana, Nuevo León, Mexico. Potatoes were planted in open field and irrigated by drip irrigation, under a traditional management scheme in the region. Five percentages of a commercial fertilizer mixture were evaluated: 100, 90, 80, 70, and 60%, each added with a dose of 597 kg ha<sup>-1</sup> of lignite coal. The control was the 100% commercial mixture without lignite coal. Each treatment was evaluated in three replicates, in a randomized complete block design. Each replicate consisted of four 157 m long rows spaced 0.9 m apart. The results obtained in this study show that the addition of 597 kg ha<sup>-1</sup> of lignite coal to physical fertilizer mixtures increased the efficiency and utilization of the fertilizers applied, considering that the growth, productivity, and quality of the potato crop were similar at chemical fertilization rates of 60-70%. Additionally, improvements in soil properties were observed, such as a 27.1% increase in moisture retention and maintenance of organic matter content. Furthermore, the use of lignite coal is an economically viable option, as it reduced fertilization costs in this study by up to 32.2%. Overall, the integration of lignite coal as an amendment represents a sustainable and profitable strategy that optimizes fertilizer efficiency, promotes soil health, and contributes to more environmentally responsible agriculture.

**Keywords:** Fertilization, Efficient use, Sustainable production.

## INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas décadas, el uso masivo de fertilizantes ha permitido un aumento significativo en la capacidad global de producción de alimentos (Priya et al., 2023). Sin embargo, recientemente diversos estudios han evidenciado las ineficiencias y desigualdades en su aplicación, lo que ha generado problemas ambientales, desequilibrios en la nutrición del suelo y una producción agrícola subóptima. La gestión inadecuada de la fertilización a nivel mundial ha dado lugar a dos escenarios contrapuestos: por un lado, existen regiones con un severo déficit de nutrientes en sus suelos debido a la sobre explotación y a un acceso limitado a fertilizantes, lo que restringe la producción de alimentos; por otro, hay zonas con un uso excesivo de estos insumos, lo que provoca contaminación ambiental y riesgos para la salud humana. Ante este panorama, resulta imperativo optimizar el uso de fertilizantes con el fin de garantizar tanto la seguridad alimentaria como la sostenibilidad ambiental (Penuelas et al., 2023).

Entre las alternativas para optimizar el uso de los fertilizantes, están los residuos de carbón mineral y en particular el carbón lignito, dado su alto contenido de materia orgánica (65 a 70%), su capacidad para mejorar la retención de agua y nutrientes en el suelo, lo convierten en una enmienda prometedora, que además de contribuir en la regeneración de suelos degradados y la mitigación del impacto ambiental de la agricultura (Rashid et al., 2023, Maciejewska et al., 2024, Ding et al., 2016).

Por otro lado, este producto es un residuo de la industria minera debido a su bajo poder calórico (10 y 20 MJ kg<sup>-1</sup>), pero dado su potencial uso en la agricultura, permitirá dar un valor agregado (SIN, 2012). Sin embargo, para implementarlo en un paquete tecnológico, es necesario caracterizarlo, validar su eficiencia y posibles impactos negativos en el cultivo y el medio ambiente.

Se eligió el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) por su importancia, alimenticia, económica e industrial (White et al., 2009, Singh & Buckseth, 2024). Además, por ser uno de los cultivos donde se utiliza en alta proporción, fertilización de base mediante mezclas físicas.

Por lo anterior este trabajo se realizó con el siguiente

### **Objetivo**

Evaluar el carbón lignito adicionado a mezclas físicas de fertilizantes base para aumentar su eficiencia y determinar el efecto en el cultivo de papa.

### **Objetivos específicos:**

1. Evaluar el efecto del carbón lignito sobre la eficiencia de los fertilizantes base.
2. Evaluar el efecto del carbón lignito en el suelo.
3. Realizar un análisis del ahorro en costos de fertilizantes con el uso del carbón lignito.

### **Hipótesis**

La adición del carbón lignito a las mezclas físicas de fertilizantes base incrementará el rendimiento por unidad de fertilizante, y su aplicación mejorará el suelo y será económicamente viable.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Los Fertilizantes

La producción agrícola moderna depende en gran medida del uso de insumos que optimicen el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Entre ellos, los fertilizantes han sido fundamentales para incrementar los rendimientos, satisfacer la demanda alimentaria y suplir la baja fertilidad de muchos suelos agrícolas. Sin embargo, el uso excesivo o ineficiente de estos productos puede generar pérdidas económicas y deterioro ambiental, lo que ha motivado la búsqueda de estrategias que mejoren su aprovechamiento por parte de las plantas (Chávez-Díaz et al., 2020).

### Eficiencia de los Fertilizantes

La aplicación de fertilizantes es necesaria para la reposición continua de nutrientes en los suelos, manteniendo la fertilidad de los mismos. El uso prolongado conduce a una reducción de la calidad del suelo. El aumento de la eficiencia en el uso de nutrientes mejora estos problemas al garantizar una mejor sincronización de la disponibilidad de nutrientes con la absorción de nutrientes. Sin aumentar la frecuencia de fertilización y el costo de mano de obra asociado (que se encuentra en la fertilización dividida), los fertilizantes de eficiencia mejorada (EEF) hacen que los nutrientes estén disponibles gradualmente durante un largo período de tiempo, asegurando que las necesidades de las plantas se satisfagan después de una sola fertilización estacional, sin comprometer la integridad del suelo. (Asadu et al., 2024).

Los EEF representan una alternativa prometedora para incrementar la productividad agrícola, contribuyendo a la seguridad alimentaria mediante la provisión de nutrientes más equilibrados y con menor impacto ambiental que los agroquímicos convencionales. Estos fertilizantes se clasifican principalmente en dos grupos: (1) inhibidores de la ureasa y la nitrificación, con efectos de corta duración pero uso extendido desde la década de 1960, y (2) fertilizantes de liberación lenta o controlada, desarrollados en los años 70 y basados en

formulaciones comerciales, muchas de ellas con polímeros sintéticos (Melara et al., 2024).

En este contexto, han surgido alternativas complementarias a la fertilización tradicional, como los estimulantes. Aunque no reemplazan a los fertilizantes, estos compuestos pueden mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes, fortalecer la tolerancia al estrés y estimular el desarrollo vegetal, haciendo más sostenibles los sistemas de producción.

### **Estimulación**

En la agricultura moderna, se ha incrementado el interés en el uso de estimulantes del crecimiento vegetal, una categoría amplia que incluye tanto compuestos naturales como formulaciones comerciales. Dentro de este grupo, los bioestimulantes constituyen sustancias, que por su acción pueden estimular el crecimiento de la planta, mejorar la absorción de nutrientes e incrementar los rendimientos en condiciones de estrés ambiental, independientemente de que contengan elementos nutrientes en su composición (Veobides-Amador et al., 2018).

A la par de estas estrategias, se ha comenzado a explorar el uso de materiales derivados de procesos geológicos o térmicos, como el carbón mineral, en la mejora de las propiedades del suelo y la disponibilidad de nutrientes. Su capacidad para retener compuestos, modificar la estructura del suelo y contribuir al ciclo del carbono ha despertado interés en su aplicación agrícola.

## **El Carbón Mineral**

### **Concepto y Características**

El carbón Mineral es una roca sedimentaria de color negro, muy rica en carbono y con cantidades variables de otros elementos como hidrógeno, azufre, oxígeno y nitrógeno. Arde fácilmente y es uno de los combustibles fósiles más utilizados. Es una mezcla de la descomposición de componentes orgánicos acumulados en zonas pantanosas, lagunares o marinas, de poca profundidad, cubiertas o sepultadas por sedimentos que con el paso del tiempo, incrementan las

condiciones de presión y temperatura produciendo un progresivo enriquecimiento en carbono, lo cual se conoce como carbonificación y da lugar a la formación de los diferentes tipos de carbón mineral, como el carbón lignito: de color pardo, con poco poder calórico, y carbón antracítico: el cual contiene la mayor concentración de carbono, y es el más duro y brillante (Servicio Geológico Mexicano, 2019).

Los principales yacimientos de carbón se localizan en los estados de Coahuila, Sonora y Oaxaca. Actualmente México produce alrededor de 13 millones de toneladas anuales, las cuales se producen casi en su totalidad en el estado de Coahuila de acuerdo con datos de la Secretaría de Economía (2022).



**Figura 1. Principales cuencas carboníferas en México**

Dentro del carbón mineral, el lignito destaca por su bajo grado de carbonificación y su alto contenido de materia orgánica, lo que lo convierte en una alternativa interesante para aplicaciones agrícolas y ambientales

### **Características Particulares de los Residuos de Carbón Mineral**

Según la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA, por sus siglas en inglés), los desechos generados durante la extracción y el beneficio de minerales se consideran residuos de procesamiento de minerales. Estos pueden clasificarse en diversas categorías, entre las que se incluyen: roca estéril, relaves de molinos, residuos de carbón, lodos de lavado y esquisto bituminoso usado. La extracción y procesamiento de minerales produce grandes volúmenes de residuos, los cuales son, en su mayoría, de naturaleza similar a la tierra o a las rocas. En particular, los residuos de carbón suelen contener minerales con compuestos de azufre, como la pirita, que pueden representar riesgos ambientales si no se manejan adecuadamente (Federal Highway Administration, 1977).

### **El Carbón Lignito**

El lignito es una fuente de energía primaria e importante que constituye un suministro significativo tanto de energía como de materia prima química debido a su abundancia, fácil acceso y bajo costo de minería (Zheng et al., 2014). Su color varía entre pardo y negro. Este material contiene entre un 60% y un 75% de carbono, con un menor contenido de agua en comparación con la turba. Aunque es considerado un combustible de calidad intermedia, es fácil de encender debido a su alto contenido de compuestos volátiles. Sin embargo, su poder calorífico es relativamente bajo, situándose entre 10 y 20 MJ kg<sup>-1</sup> (SIN, 2012) (Secretaría de Minería, 2017).

### **Beneficios del Lignito en el Suelo y la Nutrición Vegetal**

La aplicación del carbón contribuye al cambio de la conductividad térmica del suelo y esta enmienda es promotora del crecimiento de las plantas en suelos pobres en materia orgánica, o muy calizos. La diferencia entre dosis de carbón no es significativa respecto a la conductividad térmica del suelo, pero sí respecto a la supervivencia, tamaño y longitud de hojas de las plantas; esto da cuenta de la importancia de evaluar la dosis adecuada para la mejora de las propiedades del suelo y el crecimiento de las plantas (Ortiz & Ramirez, 2022).

Estudios previos han demostrado el potencial de utilizar los residuos de lignito como un aditivo eficaz para el suelo, por un lado, y como una forma ecológica de eliminar los residuos (Solek-Podwika et al., 2023). La aplicación de fertilizantes compuestos de carbón puede promover la diversidad bacteriana del suelo y la composición de la comunidad al mejorar los nutrientes del suelo y mejorar los grupos bacterianos beneficiosos que desempeñan un papel importante en la función del ecosistema (Meng et al., 2023).

Las vetas de carbón y los desechos generados durante las operaciones de minería y procesamiento generalmente se consideran económicamente inviables y deterioran la salud pública y ambiental. Sin embargo, según numerosos estudios existentes y evaluaciones interdisciplinarias, los carbones de bajo rango podrían usarse con éxito para la producción de enmiendas / acondicionadores del suelo y la recuperación de tierras perturbadas. Los diferentes tipos y combinaciones de carbón de bajo rango (LRC) aplicados al suelo a tasas específicas pueden proporcionar varios beneficios a corto y mediano plazo, es decir, mejorar la estructura del suelo, mejorar la movilidad de los nutrientes, estimular la actividad microbiana y enzimática; mejorar la productividad del suelo y el rendimiento de los cultivos (N. S. Akimbekov et al., 2021).

Evaluar el uso de lignito como complemento en la fertilización requiere un modelo de cultivo que sea sensible a la disponibilidad de nutrientes y representativo en términos económicos. En este sentido, la papa (*Solanum tuberosum* L.) representa un sistema ideal debido a su alta exigencia nutrimental, su respuesta directa al manejo agronómico y su importancia en la seguridad alimentaria a nivel mundial.

## **Generalidades del Cultivo de la Papa**

### **Origen**

Las primeras papas (*Solanum tuberosum*) cultivadas, probablemente fueron seleccionadas entre 6,000 y 10,000 años atrás, al norte del lago Titicaca, en los Andes del sur de Perú. A partir de allí, las especies silvestres *Solanum*

*bukasovii*, *S. canasense* y *S. multissectum*, pertenecientes al complejo *S. brevicaulis*, se cree que se originó *S. stenotomum*, que es considerada la primera papa domesticada. Esta, a su vez, habría dado origen a *S. andigena* a través de repetidos procesos de poliploidización sexual en diferentes zonas de cultivo, con la consiguiente hibridación interespecífica e intervarietal que permitió ampliar la diversidad y adaptabilidad genética de la papa de los Andes. Los cultivares chilenos se derivaron posteriormente por hibridación de poblaciones andinas cultivadas con la especie silvestre *S. tarijense*. En el siglo XVI la papa migró a Europa y se dispersó por todo el orbe. Actualmente las papas cultivadas que se siembran en el mundo son conocidas colectivamente bajo el nombre de *S. tuberosum* (Rodríguez, 2010).

### **Morfología y Ciclo de Vida**

La edad de crecimiento y desarrollo de la papa se puede dividir en seis fases principales:

1. Etapa de latencia, los tubérculos recién cosechados experimentan un período de latencia en el que se inhibe el crecimiento visible de las yemas. Esta fase es vital para la supervivencia del tubérculo, y durante este período, el crecimiento visible de los brotes está ausente.
2. La brotación del tubérculo de papa es la aparición y el crecimiento observables de los brotes, de los “ojos” después del período de latencia, pues los tejidos meristemáticos dentro se activan, iniciando el desarrollo de brotes, muchas veces en el almacenamiento postcosecha prolongado. La germinación provocará cambios en los nutrientes y componentes químicos, así como otras pérdidas de calidad (Zhang et al., 2024).
3. La etapa de crecimiento vegetativo se inicia con la formación de brotes hasta que se forman de 8 a 12 hojas. Además, en esta etapa se forman el sistema radicular y los estolones.
4. La inducción e iniciación de los tubérculos comienza con la aparición de los tubérculos al final de los estolones hasta el perfecto desarrollo del sistema foliar.

5. Desarrollo del tubérculo, en esta etapa se produce un progreso significativo en la elongación y producción del tubérculo mientras que el crecimiento vegetativo y los sistemas radiculares dejan de crecer.
6. Maduración del tubérculo, donde se inicia el envejecimiento fisiológico de la estructura de la hoja y el tensado y engrosamiento de la piel del tubérculo (Saidi & Hajibarat, 2021).

### **Usos de la Papa**

La papa es un cultivo versátil que, una vez cosechado, se destina a diversos usos más allá de su consumo como hortaliza en el hogar. Menos del 50% de la producción mundial se consume en fresco; el resto se emplea en la elaboración de alimentos procesados, ingredientes industriales, piensos para ganado y aves de corral, producción de almidón para la industria y como semilla para futuras cosechas.

#### **Alimenticios.**

- **Papa fresca:** Se prepara horneada, hervida o frita, y se utiliza en una amplia variedad de recetas como purés, sopas, ensaladas y gratinados.
- **Productos procesados:** El consumo global se inclina hacia productos con valor añadido, como las papas “congeladas”, que incluyen las papas fritas servidas en restaurantes y cadenas de comida rápida. Además, las hojuelas crocantes de papa, conocidas como “chips”, son populares en muchos países desarrollados.

#### **Industriales**

- **Harina de papa:** Utilizada en la industria alimentaria para aglutinar productos cárnicos diversos y espesar salsas y sopas, gracias a su alto contenido de almidón y ausencia de gluten.
- **Elaboración de alcoholes:** La papa se emplea en la producción de bebidas alcohólicas como el vodka y el aquavit escandinavo, mediante procesos de fermentación y destilación.

- **Producción de almidón:** El almidón extraído de la papa se utiliza en la industria para fabricar edulcorantes como fructosa y glucosa, y como espesante y estabilizante en productos como helados, salsas y sopas.

En resumen, la papa es un recurso agrícola de gran importancia que, debido a su versatilidad, se destina a múltiples aplicaciones tanto en el ámbito alimentario como industrial (ONUAA, 2009).

### **Requerimientos Agroclimáticos**

Hoy la papa es el quinto cultivo más importante a nivel mundial, después del trigo, maíz, arroz y caña de azúcar. Está contribuyendo a la seguridad alimentaria y nutricional en el mundo. En las últimas décadas, la papa se ha convertido en el cultivo básico de más rápido crecimiento y para hortalizas. La patata es una planta típica principalmente de clima templado y cuando la duración del día es más corta. Se caracteriza por tener características específicas requisitos de temperatura. Se adapta a diversas condiciones agroecológicas, pero su crecimiento óptimo se da en temperaturas entre 15 y 20 °C, con suelos bien drenados y ricos en materia orgánica. Requiere entre 500 y 800 mm de agua durante su ciclo productivo y es altamente sensible a heladas y sequías (Barman et al., 2019). No obstante, más allá del clima, el manejo agronómico cumple un papel esencial para garantizar un desarrollo óptimo del cultivo.

### **Manejo Agronómico del Cultivo de la Papa**

#### **Condiciones de Almacenamiento de los Tubérculos de Papa**

La conservación de la patata puede ayudar a reducir la pérdida y el desperdicio de alimentos, al tiempo que aumenta la seguridad alimentaria a largo plazo, ya que la patata es uno de los cultivos más importantes del mundo. El cambio climático puede afectar negativamente el almacenamiento de papa, especialmente la brotación de tubérculos y las enfermedades en las cámaras de almacenamiento. Los valores más bajos del coeficiente de Sielianinov (que indican condiciones secas y calurosas) durante la temporada vegetativa del

cultivo de la papa pueden conducir a una brotación más temprana. Por ejemplo, una disminución de 0.05 en el coeficiente de Sielianinov durante la temporada de crecimiento da como resultado que los tubérculos almacenados a 3 °C broten 25 días antes y los tubérculos almacenados a 5 °C experimenten una reducción de 15 días en la latencia. Esto se debe al hecho de que las condiciones climáticas secas y cálidas durante el período de vegetación de la siembra de papa tienden a acortar la latencia natural de los tubérculos, lo que conduce a una brotación más temprana durante el almacenamiento. Además, los valores altos del coeficiente de Sielianinov pueden conducir a peores situaciones de enfermedad (Zhang et al., 2024).

### **Preparación del Suelo y Siembra**

El cultivo de la papa demanda suelos con buena aireación y drenaje. La preparación del terreno incluye arado profundo, rastreo y formación de surcos o camas elevadas. La siembra se realiza mediante tubérculos-semillas a una profundidad de 8 a 12 cm, con distancias entre plantas de 25 a 35 cm y entre surcos de 75 a 90 cm. Una vez preparado el terreno para asegurar una adecuada aireación y estructura del suelo, el siguiente aspecto clave en el establecimiento del cultivo es el manejo del riego, fundamental para garantizar una disponibilidad hídrica constante durante las etapas críticas de desarrollo.

### **Riego**

Las papas se cultivan bajo diferentes métodos de riego, superficial o “rodado”, por aspersión y goteo. El manejo del riego en la papa, al igual que en otros cultivos, debe seguir los principios de las relaciones planta-agua, la programación del riego, el monitoreo de la humedad del suelo en la zona de la raíz de la papa durante la temporada de crecimiento, la relación entre el riego y las etapas de crecimiento de la papa. Las mejores prácticas de gestión del agua deben tener en cuenta la sostenibilidad ambiental y la rentabilidad económica. Se considera que la papa es extremadamente sensible al estrés hídrico durante las etapas de iniciación y crecimiento del tubérculo, y cualquier déficit de agua durante estas

etapas afectará el rendimiento y la calidad del cultivo y el rendimiento económico neto del sistema de producción. Se podrían utilizar diferentes sensores de humedad del suelo disponibles para la gestión del almacenamiento del suelo en tiempo real que ayuda a evitar el estrés hídrico en la planta de papa cada vez que se alcanza el punto de activación o el umbral inferior de almacenamiento del suelo. Los productores de papa deben considerar 60 cm como la zona radicular máxima de la planta de papa en la estimación de la profundidad de riego y asegurar una distribución uniforme del agua. Bajo disponibilidad limitada de agua, el riego deficitario es una excelente opción para aumentar la eficiencia en el uso del agua de la papa, sin embargo, el umbral debe establecerse de acuerdo con el tipo de suelo, la disponibilidad de agua y los objetivos de beneficio económico. En condiciones áridas y semiáridas con temperaturas de aire caliente, se recomienda utilizar un sistema de riego por aspersión para limitar la infestación de ácaros (Djaman et al., 2021).

Como regla general se puede decir que, a mayor demanda hídrica del cultivo, los intervalos de riego deben ser más cortos. En suelos franco-arcillosos que en promedio contienen 35% de arcilla, 30% de limo y 35% de arena, con bajo contenido de materia orgánica (menor 1%) y un contenido de humedad a capacidad de campo de  $0.358 \text{ cm}^3$  y punto de marchitez permanente de  $0.216 \text{ cm}^3$ , el último riego se puede aplicar cuando el tubérculo tiene un diámetro de 5 cm y su cascara está completa (Sifuentes Ibarra et al., 2015). Junto con un manejo adecuado del riego, la fertilización constituye otro pilar fundamental para asegurar el crecimiento y rendimiento óptimo del cultivo, al proporcionar los nutrientes esenciales en el momento y forma adecuados.

### **Nutrición y Fertilización**

A diferencia de otros tubérculos y tubérculos de raíz, las papas son sensibles a los cambios en los niveles de nutrientes (especialmente nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K)) que afectan a las fases vegetativas, reducen gravemente el rendimiento de los tubérculos en la fase de engorde y repercuten negativamente

en la calidad de los tubérculos (Otieno & Mageto, 2021). El nitrógeno (N) es el motor del crecimiento de las plantas, constituye entre el 1 y el 4% de la materia seca de la planta. Se absorbe del suelo en forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) o amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). En la planta, se combina con compuestos producidos por el metabolismo de los carbohidratos para formar aminoácidos y proteínas (Kahsay, 2019).

Por otra parte, el fósforo (P) se requiere en cantidades relativamente altas por el cultivo de papa en comparación con otros cultivos. El P cumple varias funciones en el metabolismo de las plantas, su papel más destacado es la transferencia de energía celular por desfosforilación de trifosfato de adenosina (ATP) a difosfato de adenosina (ADP) (Naumann et al., 2020). Los macronutrientes regulan cada aspecto de la función de la planta, incluido el metabolismo, la asignación de recursos, el crecimiento y el desarrollo. El zinc (Zn) es un micronutriente vital esencial para un crecimiento óptimo y una mejor calidad de las papas (Yang et al., 2025).

Un modelo básico de nutrición y fertilización para el cultivo de papa inicia con el diagnóstico de las necesidades del suelo, lo que permite establecer un programa de fertilización de fondo previo a la siembra. Este diagnóstico contempla la estimación de la demanda nutrimental con base en el rendimiento esperado, la disponibilidad de nutrientes determinada mediante análisis químico del suelo y la eficiencia en el uso de los fertilizantes aplicados (Sifuentes-Ibarra et al., 2015).

La etapa inicial del ciclo del cultivo es crítica en términos de nutrición, por lo que una fertilización adecuada y balanceada resulta esencial. Esta debe basarse en análisis de suelo y adaptarse a las condiciones edafoclimáticas, la zona de producción y las necesidades específicas de la variedad cultivada. En la práctica, los productores suelen realizar dos aplicaciones principales de fertilizante granulado: la primera al momento de la siembra, aplicándolo al fondo del surco junto con la semilla, generalmente utilizando fórmulas con alto contenido de fósforo 10-30-10 o 12-24-12, mientras la segunda se realiza en la aporca con

fórmulas altas en potasio como 15-3-31, hidrocomplejo 18-5-15-0.6-2 (Vignola et al., 2017).

### **Formas de Fertilización**

La fertilización base es la aplicación de los nutrientes a partir de los fertilizantes de origen mineral para asegura el suministro adecuado durante las primeras etapas del desarrollo del cultivo.

**Aplicación en Banda o en Surco.** Una estrategia de fertilización bien establecida es la fertilización inicial colocada, mediante la cual los nutrientes se aplican en un área restringida cerca de la semilla (2 pulgadas) durante la siembra o cerca de la semilla tubérculo de la planta en el trasplante, en lugar de esparcir el fertilizante (Herrmann et al., 2024).

**Fertirriego.** La fertirrigación es una de las prácticas inteligentes que ayudan a lograr una producción sostenible de alimentos y minimizar la contaminación ambiental. La fertirrigación es la aplicación de fertilizantes minerales disueltos, enmiendas del suelo y otros productos solubles en agua a las raíces de los cultivos a través del agua de riego (Taha, 2022).

### **Problemas con la fertilización base (Baja eficiencia de los fertilizantes base)**

Generalmente los fertilizantes que se aplican son de baja eficiencia, que puede rondar dependiendo del nutriente ronda entre el 25 y 45 %. Se necesita un uso más eficiente de los fertilizantes nitrogenados (N), fósforo (P) y potasio (K) para la seguridad alimentaria y preservar el medio ambiente. Los desequilibrios de nutrientes, en particular el desequilibrio de la relación N:P debido a la liberación desequilibrada de N y P de las actividades antropogénicas, principalmente por la fertilización de los cultivos y la expansión de los cultivos fijadores de N que han aumentado continuamente la relación N:P del suelo, es otro problema a resolver (Penuelas et al., 2023). Ahora bien, la respuesta a la fertilización también puede

variar según la variedad cultivada, por lo que es importante considerar las características genéticas y adaptativas de cada tipo de papa.

### **Variedades de Papa de Interés Agronómico**

**Orchestra.** La patata Orchestra es una variedad semitemprana robusta y estética, concebida para el mercado de mesa y especialmente adecuada para asar o cocinar a la parrilla, gracias a su forma redondeada, su calibre uniforme y su piel y pulpa de tono amarillo claro. Destaca por su alta resistencia al estrés y su rendimiento neto elevado (PotatoPro, 2025b). La variedad presenta un contenido de materia seca del 17 % y un peso relativo bajo el agua de aproximadamente 312-319 g por tubérculo. Además, se recomienda seguir prácticas de manejo cuidadoso durante el almacenamiento y control fitosanitario, dada su sensibilidad moderada al hongo del género *Fusarium* y requerimiento de tratamientos oportunos contra el patógeno *Phytophthora* (Meijer Potato, 2025).

**Fianna.** La variedad de papa Fianna es reconocida por su alta tolerancia a la sequía y su elevado contenido de materia seca, lo que la hace especialmente adecuada tanto para la producción de papas fritas crujientes como para puré. Se clasifica como una variedad de madurez principal a tardía, con un potencial de rendimiento muy alto, incluso bajo condiciones hídricas limitadas, lo que la convierte en una opción confiable para productores en diversas zonas agroclimáticas. Los tubérculos son de tamaño medio a grande, con forma ovalada, piel crema y pulpa blanco-cremosa. En cuanto a sanidad vegetal, presenta alta resistencia a los virus PVY y A, así como buena tolerancia al tizón de los tubérculos. También muestra resistencia a nematodos de quiste (patotipos Ro1 y Ro4) y moderada resistencia al tizón tardío en follaje, lo cual refuerza su adaptabilidad y valor agronómico (PotatoPro, 2025a). Es una planta de ciclo intermedio, flor blanca, tubérculo oval, cutícula crema, pulpa blanca, y tiene moderada resistencia a podredumbre seca y a roña (Monroy et al., 2019).

**Ambra.** La variedad de papa Ambra es un cultivar de origen europeo destinado principalmente al mercado de consumo fresco. Se caracteriza por presentar tubérculos de forma oval, piel lisa de color amarillo claro y pulpa amarilla, con ojos superficiales. Posee una maduración temprana y destaca por su alto rendimiento, buena conservación postcosecha y excelente presentación comercial. Ambra muestra resistencia al nematodo dorado (*Globodera rostochiensis* Ro1, Ro4) y a la verruga de la papa (raza 1), aunque presenta susceptibilidad moderada al tizón tardío (*Phytophthora infestans*). Además, no desarrolla oscurecimiento al cocinar, lo cual la hace ideal para su preparación hervida, al vapor o al horno. Esta variedad ha demostrado una buena adaptación a diferentes condiciones edafoclimáticas, tolerando periodos de estrés hídrico y térmico, lo que la convierte en una opción viable para sistemas de producción sustentable (Agencia Canadiense de Inspección de Alimentos, 2012). No obstante, incluso con una variedad bien adaptada, el cultivo no está exento del riesgo de plagas y enfermedades, lo que hace indispensable una estrategia de manejo fitosanitario eficaz.

## **Plagas y Enfermedades del Cultivo de la Papa**

### *Principales enfermedades relacionadas a la nutrición*

Las enfermedades y plagas de la papa se pueden clasificar en categorías de hongos, bacterias, virus e insectos en función de sus respectivos patógenos; sin embargo, la principal limitante del cultivo a nivel mundial es el tizón tardío (*P. infestans*) que puede ocasionar la pérdida total si no se realiza un manejo adecuado y oportuno. *P. infestans* muta permanentemente, apareciendo razas nuevas y más agresivas, por el uso indiscriminado de fungicidas y la dispersión mundial del cultivo, donde hay diferentes condiciones ambientales, de suelo y de manejo agronómico (Vásquez-Castillo et al., 2022).

El punto negro de la patata está causado por el hongo *Colletotrichum coccodes*, y es una enfermedad de las manchas foliares y tubérculos que se ha convertido en un problema cada vez más frecuente y que conlleva pérdidas económicas

considerables; se caracteriza por lesiones plateadas/marrones en la piel del tubérculo, lo que reduce la calidad estética de las patatas destinadas al mercado de preenvasado (Sanzo-Miró et al., 2023).

La enfermedad de la verruga de la papa se considera una de las plagas cuarentenarias más importantes para la papa cultivada y es causada por el patógeno obligado *Synchytrium endobioticum*, los síntomas de la enfermedad en los tubérculos de papa se caracterizan por las malformaciones verrugosas parecidas a la coliflor que son el resultado del agrandamiento y la multiplicación celular inducida por el hongo. El tejido meristemático de tubérculos, estolones, ojos, brotes e inflorescencias puede infectarse, mientras que el sistema de raíces de la papa parece ser inmune (van de Vossenbergh et al., 2022).

**Principales plagas.** El cultivo de la papa es afectado por un gran número de insectos desde la siembra hasta la cosecha y posterior almacenamiento, de ahí la importancia de la correcta identificación de la plaga, su ciclo de vida y prácticas de manejo para un control eficiente y sostenible.

Dos especies de trips, *Frankliniella occidentalis* y *Thrips tabaci*, han adquirido gran importancia a nivel mundial por su capacidad de transmitir virus fitopatógenos a hortalizas. Estrategias de manejo incluyen el uso de trampas amarillas pegantes, monitoreo de plantas indicadoras en campo, aspersión de extractos vegetales antivirales, diseño de corredores biológicos cercanos a las plantaciones de hortalizas y empleo oportuno de insecticidas (Gendersmart et al., 2024).

En todo el mundo, la polilla del tubérculo de la papa (PTM), *Phthorimaea operculella* (Zeller), es una de las plagas más graves que afectan a la papa (*Solanum tuberosum* L.), ya sea en cultivos al aire libre o durante el almacenamiento de tubérculos (Gallego et al., 2020). Los adultos ovipositan en hojas, tallos y tubérculos; La etapa inmadura extrae las hojas causando daño

foliar, pero lo más importante, excava en los tubérculos haciéndolos invendibles (I. Rondon & Gao, 2018). A diferencia de las otras plagas clave de las papas, estas polillas de la papa son plagas de campo y de almacenamiento. En el campo, los adultos ponen huevos en el follaje de la papa y las larvas extraen el follaje y los tallos. Los tubérculos se ingresan cuando las larvas dejan tallos infectados y caen a través de grietas en el suelo, o eclosionan de huevos ovipositados directamente sobre tubérculos expuestos. Los adultos también acceden a los tubérculos a través de grietas en el suelo. Las larvas que quedan en los tubérculos en la cosecha comienzan otro ciclo de almacenamiento. Dependiendo de las condiciones de almacenamiento, puede haber varias generaciones en las papas almacenadas. El punto de entrada a la papa puede ser una fuente de infección por patógenos, lo que reduce aún más la calidad de la papa (Weintraub, 2013).

El psílido de la papa *Bactericera cockerelli* (Hemiptera: Triozidae) ha surgido recientemente como una plaga de gran importancia económica en cultivos de papa y otras solanáceas. Provoca daños directos por su alimentación y, además, transmite *Candidatus Liberibacter solanacearum* (Lso), un fitopatógeno asociado con la enfermedad del “zebra chip” en papa, la cual puede generar pérdidas millonarias para los productores. Para su control, los agricultores dependen en gran medida de aplicaciones frecuentes de insecticidas; sin embargo, estos tratamientos suelen ser poco eficaces y conllevan efectos secundarios negativos para el ambiente y la salud. *B. cockerelli* ha expandido su distribución más allá de su área nativa en el suroeste de Estados Unidos y norte de México, alcanzando países como Canadá, El Salvador, Honduras, Guatemala y Nicaragua, probablemente mediante vuelos de dispersión a mediana y larga distancia, favorecidos por corrientes de viento y actividades humanas (OLANIYAN et al., 2020).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del Sitio Experimental

#### Localización

El presente estudio se estableció en la agrícola Agrícola y Ganadera Maeve S.P.R. de R.L. propiedad del Ing. José Emilio Cárdenas Dávila. Localizado en el ejido "El Tokio", municipio de Galeana, Nuevo León, México. En las coordenadas 24° 38' latitud norte y 100° 11' longitud oeste, a 1865 msnm.

De mayo a diciembre 2024.

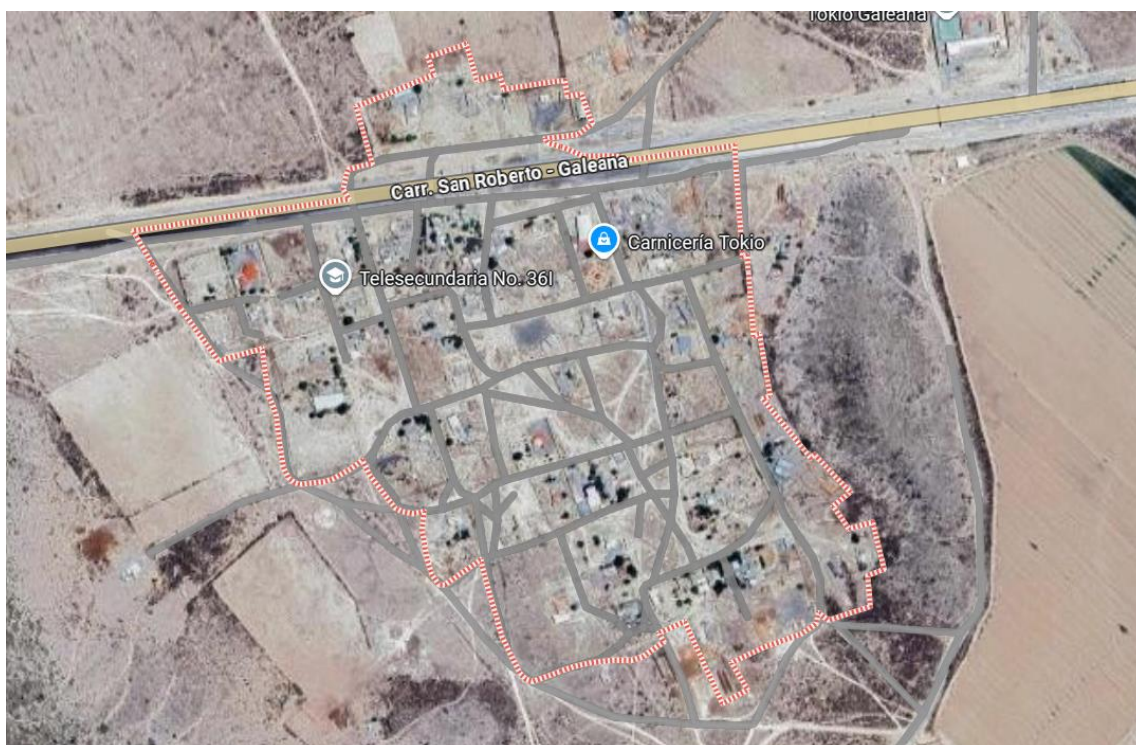


Figura 2. Localización del área de estudio en Galeana, Nuevo León

#### Descripción de Tratamientos

Se evaluaron cinco porcentajes de fertilizante base 100, 90, 80, 70 y 60% a las cuales se les adicionó la dosis de  $\text{kg ha}^{-1}$  de carbón lignito y un testigo o control con la dosis al 100% sin carbón (Cuadro 1).

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos

No	Descripción	Mezcla Física		Carbón
		kg ha <sup>-1</sup>	g m <sup>-1</sup> lineal	lignito g m <sup>-1</sup> lineal
1	<b>T1: 100% Fertilización comercial (Testigo)</b>	2740	246.60	0.00
2	<b>T2: 100% Fertilización comercial + Carbón Lignito</b>	2740	246.60	53.73
3	<b>T3: 90 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	2466	221.90	53.73
4	<b>T4: 80 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	2192	197.28	53.73
5	<b>T5: 70 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	1918	172.62	53.73
6	<b>T6: 60 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	1644	147.96	53.73

Cada tratamiento se evaluó en 3 repeticiones, en un diseño de bloques completos al azar y cada tratamiento constó de 4 surcos de 157 m., de longitud y una separación entre surcos de 0.9 m. Sembrados a hilera sencilla, con 5 tubérculos por metro lineal.

#### **Obtención del Carbón Lignito**

El Carbón Lignito utilizado se obtuvo de la empresa “Minería y Energía del Noreste S.A.”, con minas de carbón de la comunidad Colombia, Anáhuac, Nuevo León (Figura 3). El Carbón Lignito que se considera adecuado por las concentraciones de 69% carbono, 5.2% hidrógeno 25% oxígeno y también contiene azufre (S) y hierro (Fe) (Véase Anexo 1).



Figura 3. Minas de donde proviene el carbón lignito

### **Obtención de la Semilla de Papa**

Se emplearon semillas comerciales de la variedad Fianna, generación 2, tamaño o calibre cuartas, de un peso promedio de 100 g., procedentes de la región de Galeana N.L.

**Almacenamiento.** Los tubérculos se almacenaron durante seis meses, a una Humedad relativa 85-90% y temperatura de 15-20 °C (Evitando temperaturas por debajo de 4 °C para prevenir endulzamiento por frío).

**Preparación del Terreno.** Previo a la siembra, se prepararon 30 has, con barbecho, rastra y surcado; los surcos a una separación de 0.9 m, riego por goteo con cintilla Toro® calibre 6 mil, de 5/8 emisores a 20 cm, con un gasto de 1.01 litros por hora por emisor. A la mitad del lote, se seleccionaron 1.2 ha de terreno para el estudio.

## Preparación de las Mezclas Físicas de Fertilizantes Base y Adición del Carbón Lignito.

### Muestreo del Suelo y Agua

Previo al establecimiento del experimento, se realizó un muestreo del suelo y del agua de riego. El análisis del suelo se realizó en el laboratorio FERTILAB, donde se determinó una textura franco-limosa, pH de 7.91, conductividad eléctrica (CE) de 4.92 mS cm<sup>-1</sup> y contenido de materia orgánica (MO) de 2.88 %. El agua de riego se analizó en PHYTOMONITOR, registrando un pH de 7.8 y conductividad eléctrica de 3.27 mS m<sup>-1</sup>. Ambos análisis sirvieron como base para el diseño y ajuste del plan de fertilización (Ver Anexos 2 y 4). Las mezclas de fertilizante se calcularon en base al requerimiento del cultivo y los resultados del análisis de suelo y agua (Cuadro 2) (KESWICK, 2004).

Cuadro 2. Fertilizantes utilizados para la elaboración de la mezcla física de fertilizantes base calculada para el cultivo de papa

<b>(2,740 kg ha<sup>-1</sup>)</b>				
<b>Cantidad kg ha<sup>-1</sup></b>	<b>Composición</b>	<b>Nombre Comercial</b>	<b>kg parcela experimental</b>	<b>g por metro lineal del surco</b>
<b>200</b>	18-46-00	DAP	36.49	18
<b>500</b>	20.5-00-00 (24 S)	Sulfato de amonio	91.24	45
<b>500</b>	00-20-00 (14 S), (20 Ca)	Super Fosfato de Calcio Simple estándar	91.24	45
<b>500</b>	03-18-00 (14 S), (20 Ca)	Super Fosfato de Calcio Simple granulado	91.24	45

<b>500</b>	00-00-50 (18 S)	Sulfato de potasio	91.24	45
<b>500</b>	Variable	Champiñonaza	91.24	45
<b>40</b>	11-48-00	Easy Start (Compo expert)	7.29	3.6

Una vez preparada la mezcla de fertilizantes se les adicionó el equivalente a 597 kg ha<sup>-1</sup> de Carbón Lignito y se mezcló en una mezcladora de la empresa Keswick S.A. de C.V.

### Aplicación de los Tratamientos

La aplicación de los tratamientos se realizó al momento de siembra con una maquina sembradora y fertilizadora propiedad de la agrícola.



Figura 4. Aplicación de los tratamientos

El cuadro 3 resume el programa de aplicaciones de fertilizantes y fungicidas efectuadas a través del sistema de fertirriego durante las diferentes etapas fenológicas del cultivo de la papa. Cabe destacar que el manejo agronómico, tanto en la nutrición como en el riego, fue uniforme en todos los tratamientos, incluyendo el suministro de agua, la fertilización vía riego y foliar, así como las aplicaciones de protección.

Cuadro 3. Programa de aplicaciones agrícolas

FERTOINUTRIGACIÓN						
TIPO DE APLICACIÓN		RIEGO - GOTEO			VÁLVULA DE 4 HA	
Aplicaciones						
N°	FECHA	FERTILIZANTE	MEJORADOR	BIOESTIMULANTE	JUNGICIDA/BACTERICID	DOSIS
<u>1</u>	Julio 16 de 2024		INFILTRA			5 L
<u>2</u>	Julio 18 de 2024	NOVATEC SOLUB 14-48-00+ME; - BASAFER PLUS EDDHA 6%;		ALGAS MARINAS		6.25 Kg; 1Kg; 1L
<u>3</u>	Julio 20 de 2024		ALUBION X			2L
<u>4</u>	Agosto 01 de 2024	UREA FOSFATO 17-44-00	PROMESOL		FRUTIDERM AGRY-GENT PLUS 800	6.25 Kg 4 L 2L 250 mL
<u>5</u>	Agosto 05 de 2024	NOVATEC SOLUB 14-48-00+M.E; NOVATEC SOLUB 21				6.25 Kg 6.25 Kg
<u>6</u>	Agosto 09 de 2025	POLYFEED 19-19-19 + M.E. ; SULFATO DE AMONIO ULTRASOLUBLE 20.5-00-00 24S		ÁCIDOS HÚMICOS		12.5 Kg . 12.5 Kg 2.5 Kg
<u>7</u>	Agosto 13 de 2024	SULFATO DE AMONIO ULTRASOLUBLE 20.5-00-00 24S; POLYFEED 19-19-19 + M.E				12.5 Kg 12.5 Kg
<u>8</u>	Agosto 17 de 2024	FOSFATO MONAMÓNICO 12-61-00 + M.E; NOVATEC SOLUB 21; ULTRA N 30		ÁCIDOS HÚMICOS		6.25 Kg 6.25 Kg 5 L 2 Kg
<u>9</u>	Agosto 21 de 2024	FOSFATO MONAMÓNICO 12-61-00 + M.E; SULFATO DE AMONIO ULTRASOLUBLE 20.5-00-00 24S				. 12.5 Kg . 12.5 Kg
<u>10</u>	Agosto 24 de 2024	FOSFATO MONAMÓNICO 12-61-00 + M.E; IMPULSOX 8-24-4 NITRATO DE MAGNESIO				. 6.25 5 L 6.25 Kg
<u>11</u>	Septiembre 05 de 2024	UREA USO AGRÍCOLA; NITRATO DE MAGNESIO BASAFER PLUS EDDHA 6%;				12.5 Kg 6.25 Kg 1 Kg
<u>12</u>	Septiembre 10 de 2024	IMPULSOX 8-24-4 NITRATO DE MAGNESIO		HUMUS DE LOMBRIZ		5 L 6.25 Kg 15 L
<u>13</u>	Septiembre 21 de 2024	NITRATO DE MAGNESIO NITRATO DE POTASIO		HUMUS DE LOMBRIZ		6.25 Kg 6.25 Kg 10 L
<u>14</u>	Septiembre 27 de 2024	NITRATO DE POTASIO UREA USO AGRÍCOLA; FOSFATO MONAMÓNICO 12-61-00 + M.E;				6.25 Kg 6.25 Kg 6.25 Kg
<u>15</u>	Octubre 05 de 2024	UREA USO AGRÍCOLA;				12.5 Kg
<u>16</u>	Octubre 15 de 2024					

## Cosecha

Se realizó cuando los tubérculos alcanzaron su madurez fisiológica, a 120 días después de la siembra. Se cosechó en condiciones de suelo seco para evitar daños mecánicos.

## Variables Evaluadas

### En el suelo

**Materia Orgánica y Contenido de Nutrientes.** Antes de la siembra y después de la cosecha.

**Temperatura, Conductividad Eléctrica, y Humedad.** Se midió, durante todo el ciclo del cultivo, se realizaron mediciones mensuales utilizando un medidor portátil Bluelab Pulse Multimedia EC/MC Meter. En cada evaluación se tomaron tres lecturas por surco.

### En la Planta

**Altura de la planta y Diámetro de Tallo.** La altura se midió en cm., con un flexómetro marca Pretul, tomando el dato desde la base del tallo principal hasta el ápice de la *planta*. El diámetro de tallo en mm., con un vernier digital marca Mitutoyo.

**Número de tallos.** En la etapa vegetativa de forma visual se contabilizó la cantidad de tallos desarrollados por la planta 50 días después de la siembra, el resultado se expresó en unidades (n).

**Contenido de Clorofila.** La clorofila se determinó de forma indirecta, una vez durante el ciclo del cultivo, 50 días después de la siembra mediante el método SPAD, con un medidor portátil (marca KONICA modelo MINOLTA 502) realizando la medición entre las 11:00 y 12:00 h del día con presencia de luz solar al máximo.

**Contenido Mineral en Hojas.** El muestreo se realizó durante la etapa vegetativa, cuando las plantas tenían 30 cm, se seleccionaron entre 40 a 60 hojas compuestas con madurez fisiológica, únicamente de plantas sanas, colocando las muestras en bolsas de papel estraza previamente identificadas y se enviaron

al laboratorio de fertilab (FERTILAB, 2024) para su análisis. Se determinaron macronutrientes como: N, P, K, Ca, Mg, S, Na y micronutrientes como: Fe, Zn, Mn, Cu, B, Mo obtenidos por ICP-OES (FERTILAB, 2024).

**Rendimiento por Metro Lineal.** Se cosecharon los tubérculos de cada planta en condiciones de suelo seco para evitar daños mecánicos. Se contabilizaron y de forma manual, se eliminaron los residuos de tierra, posteriormente se pesaron cada uno de los tubérculos con una balanza digital marca Rhino (0.01 g de precisión).



Figura 5. Cosecha de papa variedad Fianna

**Porcentaje de freído.** Después de seleccionar las papas, fueron lavadas, peladas y luego cortadas en láminas finas o tiras de manera precisa, para asegurar una fritura uniforme. Posteriormente, las papas fueron pre-fritadas a una temperatura entre 140°C y 150°C. La fritura se llevó a cabo a una temperatura de 180°C, utilizando aceite de girasol, y las papas se mantuvieron en el aceite por 2 minutos y 51 segundos para evitar que se quemaran. Tras la fritura, se drenaron para eliminar el exceso de aceite y luego fueron sazonadas con sal (Alvarez & Canet, 2000).

### **Contenido de Minerales en los tubérculos**

Para la determinación de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu), boro (B), y sodio (Na), las muestras fueron secadas en estufa a una temperatura

controlada de 60 a 70 °C hasta alcanzar un peso constante y posteriormente molidas hasta obtener un polvo homogéneo, sometiéndose a un proceso de digestión ácida utilizando ácido clorhídrico (HCl) al 20%. De cada muestra se pesó 1.0 g, el cual se colocó en crisoles limpios y secos de 30 mL. Los crisoles se colocaron sobre una malla de asbesto sostenida por un trípode y se sometieron a precalcificación directa sobre un mechero Bunsen durante aproximadamente 15 minutos, o hasta que cesó la emisión de humo. Posteriormente las muestras fueron introducidas en una mufla a 600 °C durante 4 horas. Transcurrido este tiempo, la mufla se dejó enfriar antes de proceder con la digestión. Posteriormente, a cada crisol enfriado se le agregaron 50 mL de ácido clorhídrico (HCl) al 20%, asegurando la disolución completa de la ceniza. Las soluciones obtenidas se filtraron con papel filtro Whatman No. 42 hacia matraces aforados de 100 mL, realizando además dos lavados sucesivos con 5 mL de agua desionizada cada uno para garantizar la transferencia total del extracto. Finalmente, el filtrado se trasladó a frascos debidamente etiquetados para su posterior análisis (Pequerul et al., 1993), por Espectroscopía de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) marca Thermo Scientific modelo iCAP 7000 SERIES.

### **Análisis de Datos**

Los datos obtenidos fueron analizados bajo el modelo de bloques al azar y se sometieron a prueba normalidad. Con los datos normales se realizó un ANOVA y prueba de medias LSD Fisher ( $p \leq 0.05$ ). Con los datos no normales se realizó un ANOVA no paramétrico de Kruskal-Wallis. Se utilizó el programa estadístico InfoStat 2020. Además, se llevó a cabo un análisis de correlación de Spearman en el programa Minitab versión 19.1, considerando las variables agronómicas y de rendimiento, así como contenido de minerales en hojas y tubérculos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Efecto del Carbón Lignito en el Suelo

#### pH, CE y MO

Con base en los resultados de los análisis de suelo, se observó que, al comparar el análisis inicial con los tratamientos T1, T2, T4, T5, T6, el pH aumentó en 0.16, 0.13, 0.07, 0.11, 0.15 unidades respectivamente, y disminuyó en el T3 0.07 unidades (Cuadro 4; Anexos 2 y 3). Por otra parte, la conductividad eléctrica (CE) mostró una reducción en los tratamientos T1 al T6 de 2.93, 3.37, 3.07, 3.2, 2.51, 2.97  $\text{mS cm}^{-1}$  respectivamente. El carbón lignito, es un ácido carboxílico tiene la capacidad de quelatar temporalmente cationes, que son los iones que mide la CE. Por lo tanto, al estar en el complejo de los ácidos carboxílicos y no estar en forma iónica no son detectados por los medidores de CE., al ser absorbidos los iones cationes Ca, K, Mg entre otros, la CE disminuye aun y cuando en la solución del suelo queden sus equivalentes aniónicos  $\text{SO}_4$ , Cl,  $\text{NO}_3$ . No obstante, en este experimento la CE fue similar en todos los tratamientos por lo que no se relacionó directamente con la aplicación de carbón lignito. Por tanto, la disminución parece deberse principalmente a procesos asociados al propio cultivo, como la absorción de nutrientes por las plantas, el movimiento de sales por efecto del riego y el posible lavado de iones hacia capas más profundas (Symanowicz & Toczko, 2023) y a la eliminación de los carbonatos del suelo por la adición de ácidos aplicados en el fertirriego (Canales-Almendares et al., 2021).

Respecto a la materia orgánica la disminución fue más notable en el testigo en 0.53% (Cuadro 4). La disminución en el contenido de MO, pudo estar relacionada a la actividad biológica del suelo, debido a que la actividad de la biota del suelo, que aumenta por las condiciones de humedad que deben mantenerse en el cultivo, y considerando que no hay reincorporaciones de MO al suelo hasta cuando se incorporan los esquilmos. (Hao et al., 2025). La humedad del suelo aumentó un 1% en el T6 y disminuyó 1.1 % en el testigo. Debido a que el carbón lignito mejora la retención hídrica y capacidad de campo, al aumentar la porosidad del suelo y la CIC (Głąb et al., 2024).

En cuanto a la temperatura del suelo, aunque sin diferencias significativas, disminuyó en todos los tratamientos T1-T6 en 2.03, 2.97, 2.13, 1.73 y 1.43°C al reducir la dosis de fertilizante. Este comportamiento podría estar asociado al área foliar de la planta (Cuadro 6) lo cual habría estado favorecido por la creación de un microclima más cálido en la zona radicular, generando condiciones más favorables para el desarrollo del cultivo (Chaves-Barrantes y Gutiérrez-Soto, 2017). La explicación puede estar fundamentada que durante las etapas de desarrollo de la planta absorbió los iones para completar cada ciclo fenológico, por lo tanto, disminuye la conductividad eléctrica al tener menos iones en la solución.

Cuadro 4. Efecto del Carbón Lignito en el Suelo

Tratamientos	pH	MO (%)	CE (mS cm <sup>-1</sup> )	Humedad (%)	Temp (°C)
<b>Análisis inicial</b>	7.51	2.88	4.92	30	24
<b>T1: 100% Fertilización comercial (Testigo)</b>	7.67	2.35	1.99 ± 0.06 a	28.90 ± 5.73 b	21.93 ± 0.68 ab
<b>T2: 100% Fertilización comercial + Carbón Lignito</b>	7.64	2.87	1.55± 0.77 a	38.33± 5.03 a	21.03 ± 0.29 b
<b>T3: 90 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	7.44	2.89	1.85± 0.10 a	30.67± 1.53 ab	21.87 ± 0.76 ab
<b>T4: 80 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	7.58	2.93	1.72± 0.61 a	34.00± 4.58 ab	22.13 ± 0.32 ab
<b>T5: 70 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	7.62	2.61	1.69± 0.41 a	39.67± 2.31 a	22.27± 0.06 a
<b>T6: 60 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	7.66	2.81	1.95± 0.19 a	31.00 ± 6.24 ab	22.57± 1.07 a
<b>CV (%)</b>			25.81	14.81	2.97

CV: Coeficiente de variación, Temp: Temperatura. Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo a LSD Fisher ( $p \leq 0.05$ ). Los valores se expresan como media ± desviación estándar, (n=3).

## **Macro y Micro Elementos en el suelo**

### **Macroelementos**

El N, K, Ca y Mg disminuyeron en todos los tratamientos (Cuadro 5). Son los elementos más móviles, y demandados por los cultivos, especialmente en los sistemas de producción intensiva (Ierna & Distefano, 2024); en el caso de N, se observa como la fertilización comercial completa sin carbón lignito, mantuvo en el suelo niveles similares al inicial, al parecer por la menor cantidad demandada del elemento, en este tratamiento las plantas tuvieron un menor desarrollo, por lo tanto menor demanda de este nutriente, que se considera uno de elementos más limitantes en el rendimiento de papa (Zarzyńska et al., 2023).

El P se incrementó, en particular en los tratamientos con el 80, 90 y 100% de fertilización comercial combinada con carbón lignito, probablemente debido a la quelatación del fosforo por el carbón lignito, lo cual reduce la interacción con el calcio y la formación de fosfatos cálcicos (Valero, Salgado, & Corzo, 2018). El S aumento porque el contenido en el suelo abastecía la demanda y por lo tanto el S en el agua de riego se acumuló (Ver análisis de suelo anexo 2 y 3) (Rivera-Gonzalez et al., 2016).

El Na se redujo, el carbón posee una estructura porosa y una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), permitiéndole adsorber iones como el Na (Ortiz & Ramirez, 2022). El Na no es un elemento esencial para la planta, pero su reducción es muy positiva, por su efecto negativo en el crecimiento de las plantas, al reducir la porosidad del suelo y la absorción de otros cationes, como el K, Ca, Mg (Ballesteros et al., 2023).

### **Microelementos**

El Fe, Zn, Mn, Cu disminuyeron, mientras que el B aumentó (Cuadro 5). Este incremento sugiere que, al contrario de los demás micronutrientes, la planta absorbió menor cantidad de B, debido tal vez a los altos niveles de Ca que se

presentaron en el suelo, ya que, aunque esto puede variar en diferentes genotipos, pueden competir por sitios de absorción ambos elementos y presentar un antagonismo (White, 2015).

Cuadro 5. Efecto del Carbón Lignito y la reducción de fertilizantes sobre el contenido de macro y micro elementos en el suelo

Tratamientos/ Minerales (mg kg <sup>-1</sup> )	Análisis Inicial	T1: FC 100%	T2: FC 100% + CL	T3: FC 90 % + CL	T4: FC 80 % + CL	T5: FC 70 % + CL	T6: FC 60 % + CL
<b>N</b>	59.2	56.6	43.2	23.3	27.1	29.8	42
<b>P</b>	2.4	16.6	20.4	18.6	20.4	14.9	14.5
<b>K</b>	780	273	287	273	249	281	257
<b>Ca</b>	15800	13797	13956	13546	13759	13787	13843
<b>Mg</b>	210	104	106	91.7	77.1	99.4	97.3
<b>S</b>	10120	16395	17240	17451	17409	18635	17113
<b>Na</b>	67	57.3	42.8	35.8	27.9	35.4	40.1
<b>Fe</b>	2.10	0.82	1.26	1.22	1.16	1.09	0.99
<b>Zn</b>	1.20	0.77	0.8	0.86	0.84	0.85	0.8
<b>Mn</b>	4.10	0.81	0.9	0.92	0.92	0.75	1.21
<b>Cu</b>	0.80	0.14	0.14	0.14	0.16	0.14	0.14
<b>B</b>	0.73	1.08	1.15	1.21	1.18	1.2	1.29

FC: Fertilización Comercial, CL: Carbón Lignito.

### Efecto del Carbón Lignito Sobre las Variables de Crecimiento de la Papa

La adición de carbón lignito no afectó el crecimiento de la planta medido como altura, diámetro y número de tallos (Cuadro 6). En este estudio la planta alcanzó una altura promedio de 60 cm., con el 70 % de la dosis recomendada de fertilizante. Este valor supera los 56 cm reportados en otros estudios bajo condiciones similares, pero con aplicación del 100 % de NPK como fertilización completa (Sai & Paswan, 2024), o con la aplicación de K a una dosis de 150 kg

ha<sup>-1</sup> (Zezelew et al., 2016). Lo anterior se traduce en un ahorro directo en fertilización.

Aun y cuando no se encontraron diferencias significativas en la concentración de clorofila entre los tratamientos y el testigo, si hubo diferencias entre las dosis de fertilizante más carbón lignito, la dosis reducida al 70% la clorofila se incrementó un 12.9% (Cuadro 6). Los resultados están en línea con otros estudios donde la aplicación de ácidos fúlvicos aumentó las unidades SPAD (clorofila) en cultivo de papa (Xu et al., 2025). A diferencia de lo encontrado por (Wadas & Dziugiel, 2020), quienes aplicaron extractos de algas marinas, así como ácidos húmicos y fúlvicos nuestros resultados muestran un incremento significativo de clorofila, lo que sugiere una mayor eficiencia fisiológica de los tratamientos aplicados.

Cuadro 6. Efecto del carbón lignito adicionado a las mezclas físicas de fertilizantes base sobre el crecimiento de la planta de papa.

TRATAMIENTOS	AP	DT	Tallos	Clorofila
	(cm)	(mm)	(Núm.)	(USPAD)
<b>T1: 100% Fertilización comercial</b>	56.22 ±	10.22±	13 ±	43.37±
<b>(Testigo)</b>	6.38 a	1.03 ab	3.06 a	2.98 ab
<b>T2: 100% Fertilización comercial</b>	55.45 ±	10.26 ±	17 ±	42.62 ±
<b>+ Carbón Lignito</b>	1.35 a	0.92 ab	4.73 a	2.01 ab
<b>T3: 90 % Fertilización comercial</b>	55.67 ±	9.96 ±	16 ±	39.42 ±
<b>+ carbón lignito</b>	1.67 a	0.17 ab	0.58 a	2.99 b
<b>T4: 80 % Fertilización comercial</b>	57.33 ±	9.25 ±	17 ±	42.05 ±
<b>+ carbón lignito</b>	3.18 a	0.74 b	2.00 a	3.15ab
<b>T5: 70 % Fertilización comercial</b>	60.44±	10.08 ±	13 ±	45.27 ±
<b>+ carbón lignito</b>	3.75 a	0.47 ab	1.00 a	1.92 a
<b>T6: 60 % Fertilización comercial</b>	59.44±	10.88 ±	18 ±	44.17 ±
<b>+ carbón lignito</b>	3.15 a	0.59 a	9.07 a	3.47 ab
<b>CV (%)</b>	5.53	7.32	6.71	6.77

CV: Coeficiente de variación, AT: Altura del tallo, DT: Diámetro del tallo, USPAD: Unidades Spad. Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo a LSD Fisher ( $p \leq 0.05$ ). Los valores se expresan como media  $\pm$  desviación estándar, ( $n=3$ ).

## **Rendimiento**

En la evaluación del número de tubérculos por metro lineal, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 7). El mayor número de tubérculos se obtuvo al agregar carbón lignito a la dosis de fertilizante reducida al 60% con 54.17 tubérculos por metro lineal, seguido por las dosis al 80 y 70% respectivamente, mientras que los valores más bajos correspondieron a las dosis del 100% y el testigo. En cuanto al peso promedio de los tubérculos, el tratamiento testigo presentó el valor más alto, en contraste con la dosis reducida al 60%, que registró el menor valor. Estos resultados sugieren que la reducción parcial de la fertilización química, acompañada de la adición de carbón lignito, favoreció la formación de un mayor número de tubérculos, aunque con una ligera disminución en el peso promedio individual. Lo anterior podría deberse a una redistribución de los recursos fotosintéticos hacia una mayor cantidad de estructuras de almacenamiento, lo que refleja un efecto compensatorio entre el número y el tamaño de los tubérculos

El rendimiento por metro lineal (Cuadro 7), no se detectaron diferencias estadísticas entre tratamientos, lo que indica que, a pesar de los cambios en número y peso individual, la producción total se mantuvo relativamente estable. Este comportamiento guarda cierta similitud con lo reportado por (David Morales-Fernández et al., 2011), quienes evaluaron el efecto de diferentes dosis de leonardita sobre el rendimiento y calidad de la papa. En su estudio, la aplicación de leonardita aumentó el número de tubérculos por planta, el rendimiento de tubérculos comercializables, y el rendimiento total, en comparación con el control. No obstante, al igual que en el presente trabajo, no se encontraron diferencias significativas en algunas variables como la altura de planta (N. Akimbekov et al., 2020)

Al realizar una extrapolación en la variable rendimiento (Cuadro 7), no hay diferencias significativas, los valores oscilan de 3.28 a 3.6 kg m<sup>-2</sup>, sin embargo, es algo interesante ya que significa que a cualquier dosis de fertilización con carbón lignito aplicada, es posible obtener un rendimiento similar, que se traduce finalmente en un beneficio económico para el productor y un beneficio ecológico para el ambiente y el suelo. Es posible que la sustitución parcial de la fertilización por el carbón lignito haya sido alcanzada porque éste puede aportar sustancias húmicas que estimulan la actividad microbiana benéfica en el suelo y liberan nutrientes de forma lenta y continua (Maffia et al., 2024).

Cuadro 7. Efecto del carbón lignito adicionado a las mezclas físicas de fertilizantes base sobre el rendimiento de papa

TRATAMIENTOS	Tubérculos por m lineal		Rendimiento	
	Número	Peso (g)	kg m lineal	kg m <sup>2</sup>
<b>T1: 100% Fertilización comercial (Testigo)</b>	42 ± 2.08 b	102.58 ± 11.45 a	4.26 ± 0.36 a	3.47 ± 0.35 a
<b>T2: 100% Fertilización comercial + Carbón Lignito</b>	37 ± 5.86 b	99.90 ± 7.39 ab	3.76 ± 0.88 a	3.28 ± 0.13 a
<b>T3: 90 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	44 ± 5.51 ab	95.05 ± 14.49 abc	4.11 ± 0.40 a	3.29 ± 0.29 a
<b>T4: 80 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	48.00 ± 4.36 ab	88.35 ± 5.15 abc	4.23 ± 0.15 a	3.44 ± 0.07 a
<b>T5: 70 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	45 ± 3.79 ab	84.44 ± 6.62 bc	3.77 ± 0.33 a	3.39 ± 0.13 a
<b>T6: 60 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	55 ± 14.19 a	83.45 ± 19.58 c	4.46 ± 1.03 a	3.66 ± 0.47 a
<b>CV (%)</b>	15.69	9.27	13.81	6.83

CV: Coeficiente de variación. Letras diferentes por columna indican diferencias significativas acuerdo a LSD Fisher ( $p \leq 0.05$ ). Los valores se expresan como media ± desviación estándar, (n=3).

## **Contenido de minerales en las hojas de papa**

### **Macroelementos**

El contenido de K, no fue afectado por la reducción de la fertilización, (Figura 5 a)) debido a las características del suelo, particularmente su contenido de arcilla, es probable que una fracción significativa del K haya quedado fijada en los coloides del suelo, lo que explicaría su baja acumulación en el tejido foliar (Torabian et al., 2021).

En el caso del N, su baja concentración también podría estar relacionada con la interacción sinérgica con el K y, sobre todo, con el hecho de que la planta se encontraba en la fase fenológica de formación y llenado del tubérculo, en la que prioriza la movilización de nutrientes hacia los tubérculos, lo cual limita su acumulación en hojas (Pinedo-Taco & Olivas Alvarado, 2023). En todos los tratamientos el nivel de S fue muy alto excepto en la dosis al 60% que estuvo dentro del rango considerado como suficiente, dado que el S participa activamente en la síntesis de aminoácidos esenciales y otras moléculas orgánicas, es probable que la planta también lo haya distribuido en todas las partes de la planta (Narayan et al., 2023; Flores-López et al., 2020). Esta distribución podría haberse visto favorecida por la alta cantidad presente en el suelo, y también por la influencia del carbón lignito, que mejora la absorción y movilidad de nutrientes (Valero, Salgado, & Bastidas, 2018).

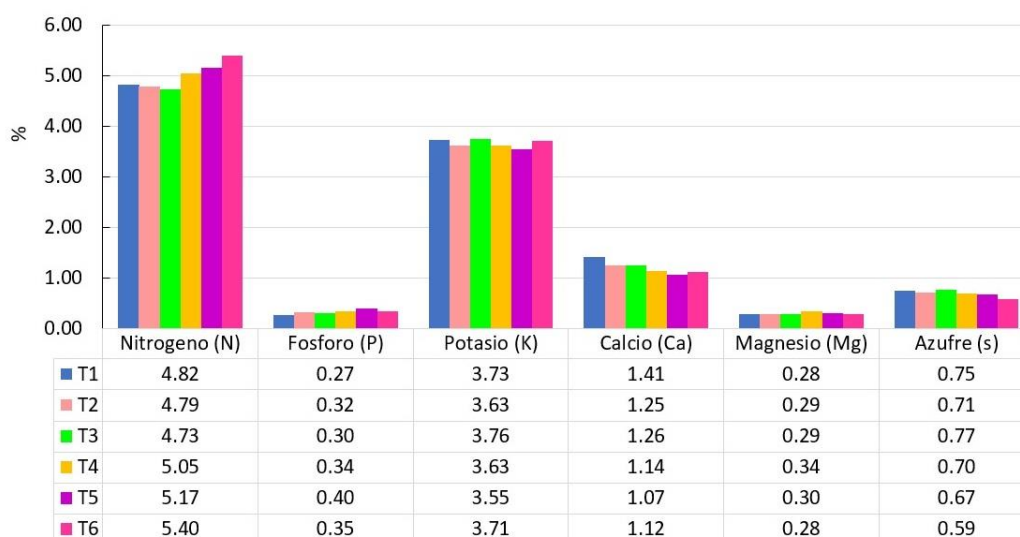
En general, la mayoría de los macronutrientes así se encontraron, por debajo de los rangos adecuados, con una deficiencia relativa observada a los 60 días, lo cual puede atribuirse a la fase de desarrollo del cultivo al momento del muestreo, en la que la demanda fisiológica está dirigida hacia los órganos de almacenamiento (Gómez et al., 2017). Esta movilización es particularmente evidente para los elementos móviles como N, P, K y Mg, los cuales cumplen funciones estructurales y bioquímicas en el desarrollo de todos los órganos vegetales. Por tanto, los niveles foliares reducidos deben interpretarse con cautela, considerando la dinámica interna del cultivo (Ishfaq et al., 2022).

### **Microelementos**

Por otra parte, en la mayoría de los micronutrientes en todos los tratamientos se tuvieron niveles suficientes (Figura 5 b)), lo que sugiere que la aplicación de carbón lignito, independientemente de la concentración de fertilización utilizada, favoreció la disponibilidad y absorción eficiente de estos elementos (FERTILAB, 2024). En cuanto al contenido de Zn y Mn el testigo y la dosis al 90% presentaron la mayor concentración, ambos potencializaron más la asimilación de esos dos micronutrientes, ya que, al ser poco móviles, necesitan ser aportados por otras formas como la ferriirrigación con quelatos, lo que se logra con una fertilización más rápida y en forma disponible (López-Rayó et al., 2015).

El lignito, rico en compuestos húmicos y fúlvicos, puede haber actuado como agente quelante, mejorando la movilidad de micronutrientes como Fe, Zn, Mn y Cu, al estimular la actividad radicular y el transporte activo a través de las membranas (Barzgar et al., 2025) estos resultados son similares a lo reportado por otros autores que encontraron resultados similares en hojas de pepino (Głąb et al., 2024). Desde una perspectiva fisiológica, esta suficiencia nutricional refleja no solo una adecuada absorción, sino también una eficiencia en procesos clave como la fotosíntesis, la activación enzimática, la síntesis de clorofila y el metabolismo del N. Además, una posible interacción sinérgica entre el fertilizante mineral y el carbono lignito debieron haber optimizado la eficiencia de uso de nutrientes, incluso bajo condiciones de fertilización moderada (Qin et al., 2023).

### a) Macroelementos



### b) Microelementos

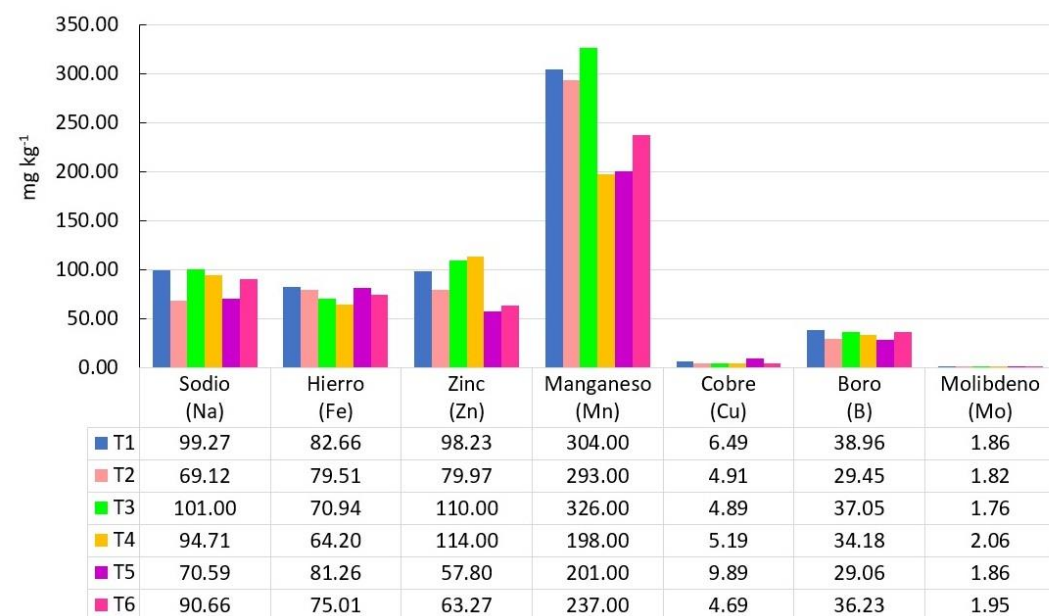


Figura 5 a) Contenido de macronutrientes y b) contenido de micronutrientes en las hojas del cultivo de papa

### Contenido de Minerales en los tubérculos de papa

El análisis del contenido mineral en los tubérculos de papa mostró que no hubo diferencias significativas en la concentración de Mg, Ca, Fe, Cu, Zn, Mn entre los

tratamientos evaluados (Cuadro 8 y 9). Estos resultados sugieren que dichos minerales mantienen una estabilidad en su acumulación dentro del tubérculo, independientemente de las condiciones de cultivo presentes. Estudios previos han reportado tendencias similares en cultivares de papa, indicando que la variabilidad en estos nutrientes y su composición fisicoquímica puede estar influenciada en mayor medida por diferentes materiales genéticos que por el entorno ambiental de cultivo (Cerón-Lasso et al., 2018; Morales-Fernández et al., 2018).

No obstante, se encontraron diferencias significativas en el contenido de Na siendo la dosis al 60% de fertilización, donde se obtuvieron valores entre 20.3 y 31.9% mayores a comparación de los demás tratamientos, además, en cuanto al contenido de K las dosis al 70 y 60%, fueron significativamente mayores en un 43.3% respecto al testigo, con valores cercanos a  $500 \text{ mg kg}^{-1}$ . Por ello, parece ser que las dosis reducidas a 60% y 70% de la fertilización completa en combinación con una aplicación constante de carbono lignito, aumentan la absorción de los cationes K y Na y su posterior translocación a los tubérculos. Esto podría atribuirse a su elevada movilidad en el floema y labilidad en el sistema suelo-planta (Ierna & Distefano, 2024) y es relevante si se considera que el K es el nutriente con mayor concentración en los tubérculos de papa, dado su papel protagónico en la síntesis y acumulación de almidón, regulación osmótica y transporte de fotoasimilados desde la parte aérea hacia los órganos de reserva (Hasanuzzaman et al., 2018).

En este sentido, el carbono lignito, al ser una fuente rica en compuestos húmicos y fúlvicos, probablemente favoreció una mayor disponibilidad del K intercambiable al reducir su fijación en coloides y estimular la absorción radicular (Arjumend et al., 2015), comprobándose que gran parte de la fertilización aplicada fue aprovechada, a diferencia de lo que sucede en muchos sistemas agrícolas, donde es perdida por volatilización, lixiviación y fijación (Wimmer et al., 2015). Al comparar los resultados obtenidos en el presente estudio con la

literatura disponible, se encontró que las concentraciones de minerales fueron similares, sobresaliendo los contenidos de Mg, Fe y Zn (FEN, 2020; Singh et al., 2022a), valores que pueden cambiar, según el material vegetal, y en especial, reducirse debido a un posterior procesamiento o al desechar la cáscara del tubérculo (Baljeet Singh et al., 2022).

Cuadro 8. Efecto de los tratamientos sobre el contenido de macronutrientes en los tubérculos

Tratamientos	K mg kg <sup>-1</sup>	Ca mg kg <sup>-1</sup>	Mg mg kg <sup>-1</sup>
<b>T1: 100% Fertilización comercial (Testigo)</b>	283.07± 3.73 b	13.60 ± 2.20 a*	1032.87 ± 259.15 a
<b>T2: 100% Fertilización comercial + Carbón Lignito</b>	399.73 ± 71.68 ab	16.53 ± 6.84 a	1050.37 ± 119.80 a
<b>T3: 90 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	419.37 ± 66.92 ab	22.47 ± 5.78 a	1146.80 ± 220.28 a
<b>T4: 80 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	376.13 ± 182.25 ab	18.87 ± 8.81 a	1071.53 ± 291.00 a
<b>T5: 70 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	498.87 ± 135.56 a	19.93 ± 8.73 a	1233.50 ± 282.72 a
<b>T6: 60 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	499.00 ± 37.06 a	45.27 ± 7.26 a	1219.73 ± 99.85 a
<b>CV (%)</b>	20.61	29.70	16.33

CV: Coeficiente de variación. Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo a LSD Fisher ( $p \leq 0.05$ ), y (\*) Kruskal-Wallis. Los valores se expresan como media  $\pm$  desviación estándar, (n=3).

Cuadro 9. Efecto de los tratamientos sobre el contenido de micronutrientes en los tubérculos

Tratamientos	Fe mg kg <sup>-1</sup>	Mn mg kg <sup>-1</sup>	Cu mg kg <sup>-1</sup>	Zn mg kg <sup>-1</sup>	Na mg kg <sup>-1</sup>
--------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

<b>T1: 100% Fertilización comercial (Testigo)</b>	31.83 ± 3.56 a	6.67 ± 2.22 a	11.23 ± 2.40 a	21.37 ± 4.15 a*	186.30 ± 23.31 b
<b>T2: 100% Fertilización comercial + Carbón Lignito</b>	32.87 ± 7.39 a	6.53 ± 0.84 a	10.93 ± 3.91 a	18.90 ± 2.69 a	209.60 ± 10.30 b
<b>T3: 90 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	39.07 ± 1.01 a	8.03 ± 2.26 a	9.53 ± 1.65 a	26.67 ± 13.74 a	217.90 ± 16.28 b
<b>T4: 80 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	39.13 ± 11.06 a	7.53 ± 2.86 a	10.47 ± 0.67 a	21.20 ± 8.57 a	203.73 ± 31.96 b
<b>T5: 70 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	44.83 ± 18.69 a	8.43 ± 2.67 a	12.20 ± 1.44 a	24.30 ± 4.56 a	209.27 ± 37.51 b
<b>T6: 60 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	44.87 ± 2.56 a	8.97 ± 1.15 a	11.70 ± 1.60 a	25.40 ± 3.57 a	273.60 ± 57.70 a
<b>CV (%)</b>	24.59	25.30	20.18	22.31	14.07

CV: Coeficiente de variación. Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo a LSD Fisher ( $p \leq 0.05$ ), y (\*) Kruskal-Wallis. Los valores se expresan como media  $\pm$  desviación estándar, (n=3).

El análisis de correlación de Spearman reveló asociaciones significativas entre varias variables agronómicas y el contenido de minerales tanto en hoja como en tubérculo ( $p < 0.05$ ) (Cuadro 10). En el tubérculo, se observaron correlaciones positivas muy fuertes entre el manganeso (Mn), magnesio (Mg) y hierro (Fe), con coeficientes de 0.886 ( $p = 0.019$ ). Esto sugiere que el incremento en la concentración de uno de estos elementos tiende a acompañarse del aumento en los otros, indicando posiblemente una absorción o acumulación conjunta de estos micronutrientes durante el desarrollo del tubérculo. Asimismo, el potasio (K) mostró una correlación positiva con el hierro ( $r = 0.829$ ;  $p = 0.042$ ), lo que apunta a una sinergia en su transporte o función metabólica. En contraste, el calcio (Ca) presentó una correlación negativa con el hierro ( $r = -0.886$ ;  $p = 0.019$ ), pero positiva con el sodio (Na) ( $r = 0.829$ ;  $p = 0.042$ ), evidenciando posibles efectos de competencia iónica entre Ca y Fe, y una asociación directa entre Ca y Na en el tubérculo. En las hojas, se registró una correlación negativa muy fuerte entre el

azufre (S) y el nitrógeno (N) ( $r = -0.943$ ;  $p = 0.005$ ), lo que podría indicar que un mayor contenido de azufre foliar se asocia a una reducción del nitrógeno disponible o acumulado, reflejando una posible interacción en la asimilación de estos nutrientes. Por otro lado, el boro (B) mostró correlación positiva con el sodio (Na) ( $r = 0.829$ ;  $p = 0.042$ ), sugiriendo una relación asociativa en su transporte o movilidad en el tejido foliar. Finalmente, a nivel agronómico, la altura de planta se correlacionó positivamente con el nitrógeno foliar ( $r = 0.886$ ;  $p = 0.019$ ), lo que indica que un mayor contenido de N en hoja se asocia con plantas más vigorosas y de mayor crecimiento. Resultados similares fueron reportados por (Rodríguez-Yzquierdo et al., 2020), quienes observaron que mayores dosis de N incrementaron la altura, número de hojas, índice de clorofila y contenido foliar de nitrógeno, evidenciando la relación directa entre este elemento y el desarrollo estructural de la planta.

Cuadro 10. Análisis de correlación de Spearman entre las variables agronómicas, rendimiento y minerales en hojas y tubérculos

<b>Variable</b>	<b>Variable</b>	<b>Correlación</b>	<b>Valores</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Spearman</b>	<b>de p</b>
Mn-tubérculo	Mg- tubérculo	0.886	0.019
Mn- tubérculo	Fe- tubérculo	0.886	0.019
Mg- tubérculo	Fe- tubérculo	0.886	0.019
K- tubérculo	Fe- tubérculo	0.829	0.042
Ca- tubérculo	Fe- tubérculo	-0.886	0.019
Ca- tubérculo	Na- tubérculo	0.829	0.042
S-hoja	N-hoja	-0.943	0.005
B-hoja	Na-hoja	0.829	0.042
Altura	N-hoja	0.886	0.019

### Porcentaje de freído en las papas

En el Cuadro 11 se puede observar que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, prácticamente todos

tuvieron un porcentaje de freído del 100%, o un valor muy cercano; algo de gran ventaja porque, aunque se reduzca la dosis de fertilización y se aplique carbón lignito, es posible obtener valores similares. Parte de la calidad final de la papa para su destino en el procesamiento para frituras está determinada por el porcentaje de freído, y esta variable puede ser influida por el aporte de agua y nutrientes, pues de esto último dependerá si son adecuadas la textura y el contenido de humedad del tubérculo cosechado (Lucas et al., 2011). Un buen freído de papa se distingue por una corteza crujiente, color dorado uniforme y bajo contenido de grasa, junto con un interior seco y firme, atributos determinados por la materia seca, la variedad y la temperatura de fritura. Estas características físicas influyen directamente en la textura y aceptación del producto (Rojas, 2022).

Cuadro 11. Porcentaje de freído en las papas

Tratamientos	% de freído
<b>T1: 100% Fertilización comercial (Testigo)</b>	99.33 ± 1.15 a*
<b>T2: 100% Fertilización comercial + Carbón Lignito</b>	100 ± 0.00 a
<b>T3: 90 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	99.67 ± 0.58 a
<b>T4: 80 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	100 ± 0.00 a
<b>T5: 70 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	99.67 ± 0.58 a
<b>T6: 60 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	98.67 ± 0.58 a
<b>CV (%)</b>	0.65

CV: Coeficiente de variación. Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo a (\*) Kruskal-Wallis. Los valores se expresan como media ± desviación estándar, (n=3).

### **Análisis de ahorro en costos**

El resultado del análisis de ahorro (Cuadro 12) reveló que es totalmente viable la producción de papa con la aplicación del 60% de la fertilización comercial con carbón lignito, pues aumenta el rendimiento, y el costo de la fertilización se reduce en 32.2%, que se traduce en un ahorro de \$0.84.00 por m<sup>2</sup> respecto a cuándo se aplicó la fertilización completa (T1), siendo la ganancia \$3.53 por m<sup>2</sup>

sigue siendo viable, respecto a cuándo se aplica la fertilización completa; sigue siendo viable, al comparar este resultado con lo obtenido en otros países, donde con la aplicación de  $300 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$  se obtuvo el margen máximo de ganancia (Zeleelew et al., 2016).

Además de mantener o incrementar el rendimiento del cultivo, se obtienen beneficios agronómicos, ambientales y económicos relevantes. La disminución en el uso de fertilizantes minerales o sintéticos contribuye a reducir la degradación física y química de los suelos, disminuyendo su salinización y favoreciendo la conservación de su estructura y fertilidad a largo plazo, coincidiendo con otros estudios la sustitución de fertilizantes químicos por fertilizantes orgánicos mejora la humedad del suelo y el contenido de materia orgánica (Bo et al., 2025). Asimismo, se reduce la acumulación de metales pesados y la lixiviación de nutrientes, con lo cual se minimiza el riesgo de contaminación de los mantos acuíferos y otros cuerpos de agua.

Desde el punto de vista energético y económico, al requerirse una menor cantidad de fertilizante por hectárea, se disminuye el consumo de materias primas para su elaboración, los costos de producción y transporte, y por ende el uso de combustibles fósiles. Todo ello se traduce en una menor emisión de gases de efecto invernadero y una reducción significativa de la huella de carbono asociada al sistema agrícola (Ali et al., 2025). En conjunto, la integración del carbón lignito como enmienda representa una estrategia sustentable que optimiza la eficiencia del fertilizante, promueve la salud del suelo y contribuye a una agricultura más responsable con el ambiente.

Cuadro 12. Inversión realizada para cada tratamiento

Tratamiento/ Inversión	Costo fertilizantes (m <sup>2</sup> )	Mano de obra (m <sup>2</sup> )	Diésel del tractor (m <sup>2</sup> )	Depreciación maquinaria (m <sup>2</sup> )	Depreciación sembradora (m <sup>2</sup> )	Depreciación tanque fertilizador (m <sup>2</sup> )	Depreciación tanque solución nutritiva y protección m <sup>2</sup> )	Total (m <sup>2</sup> ) \$\$	Rendimiento (kg m <sup>2</sup> )	Precio de venta del kg de papa \$\$	Ganancia bruta (m <sup>2</sup> ) \$\$	Ganancia neta (m <sup>2</sup> ) \$\$
<b>T1: 100% Fertilización comercial</b>	2.62	0.045	0.0405	0.013	0.012	0.06	0.0015	<b>2.79</b>	3.47	13.50	46.78	<b>43.99</b>
<b>T2: 100% Fertilización comercial + carbón lignito</b>	2.66	0.045	0.0405	0.013	0.012	0.06	0.0015	<b>2.83</b>	3.28	13.50	44.26	<b>41.42</b>
<b>T3: 90 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	2.43	0.045	0.0405	0.013	0.012	0.06	0.0015	<b>2.60</b>	3.29	13.50	44.47	<b>41.87</b>
<b>T4: 80 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	2.21	0.045	0.0405	0.013	0.012	0.06	0.0015	<b>2.39</b>	3.44	13.50	46.41	<b>44.03</b>
<b>T5: 70 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	1.99	0.045	0.0405	0.013	0.012	0.06	0.0015	<b>2.17</b>	3.39	13.50	45.71	<b>43.55</b>
<b>T6: 60 % Fertilización comercial + carbón lignito</b>	1.77	0.045	0.0405	0.013	0.012	0.06	0.0015	<b>1.95</b>	3.66	13.50	49.47	<b>47.52</b>

## CONCLUSIONES

La adición de 597 kg ha<sup>-1</sup> de carbón lignito a las mezclas físicas de fertilizante aumentó la eficiencia y aprovechamiento de los fertilizantes aplicados, basado en qué; el crecimiento, la productividad y la calidad del cultivo de papa fue similar en las dosis de fertilización química al 60-70%. Adicionalmente, se observaron mejoras en las propiedades del suelo como; el aumento en la retención de humedad en un 27.14% y sostenimiento del contenido de materia orgánica. Además, el uso de carbón lignito es una opción económicamente rentable, al reducir los costos de fertilización en este estudio hasta un 32.2%.

En conjunto, la integración del carbón lignito como enmienda representa una estrategia sustentable y económicamente rentable, que optimiza la eficiencia de los fertilizantes, promueve la salud del suelo, y contribuye a una agricultura más responsable con el ambiente.

## REFERENCIAS

- Agencia Canadiense de Inspección de Alimentos. (2012). *Ambra*.  
[https://inspection.canada.ca/en/plant-health/potatoes/potato-varieties/ambra?utm\\_source](https://inspection.canada.ca/en/plant-health/potatoes/potato-varieties/ambra?utm_source)
- Akimbekov, N., Qiao, X., Digel, I., Abdieva, G., Ualieva, P. & Zhubanova, A. (2020). The Effect of Leonardite-Derived Amendments on Soil Microbiome Structure and Potato Yield. *Agriculture*, 10(5), 147.  
<https://doi.org/10.3390/agriculture10050147>
- Akimbekov, N. S., Digel, I., Tastambek, K. T., Sherelkhan, D. K., Jussupova, D. B. & Altynbay, N. P. (2021). Low-Rank Coal as a Source of Humic Substances for Soil Amendment and Fertility Management. *Agriculture*, 11(12), 1261. <https://doi.org/10.3390/agriculture11121261>
- Ali, A., Jabeen, N., Chachar, Z., Chachar, S., Ahmed, S., Ahmed, N., Laghari, A. A., Sahito, Z. A., Farruhbek, R. & Yang, Z. (2025). The role of biochar in enhancing soil health & interactions with rhizosphere properties and enzyme activities in organic fertilizer substitution. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1595208>
- Alvarez, M. D. & Canet, W. (2000). Characterization of the frying process of fresh and blanched potato strips using response surface methodology. *European Food Research and Technology*, 211(5), 326–335. <https://doi.org/10.1007/s002170000161>
- Arjumend, T., Abbasi, M. K. & Rafique, E. (2015). Effects of lignite-derived Humic acid on some selected soil properties, growth and nutrient uptake of wheat (*Triticum Aestivum* L.) grown under greenhouse conditions. *Pakistan Journal of Botany*, 47(6), 2231–2238.
- Asadu, C. O., Ezema, C. A., Ekwueme, B. N., Onu, C. E., Onoh, I. M., Adejoh, T., Ezeorba, T. P. C., Ogbonna, C. C., Otuh, P. I., Okoye, J. O. & Emmanuel, U. O. (2024). Enhanced efficiency fertilizers: Overview of production methods, materials used, nutrients release mechanisms, benefits and considerations. *Environmental Pollution and Management*, 1, 32–48. <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.07.002>

- Ballestero, J., Barbazán, M. & Del Pino, A. (2023). Aplicación de yeso sobre un suelo con alta concentración de sodio de origen natural. *Ciencia y Tecnología*, 16(2), 1–8. <https://doi.org/10.18779/cyt.v16i2.549>
- Barman, B., Goswami, B., Khanikar, P. G., Sarmah, K., Singh, G., Singh, A., Hussain, R. & Deka, R. L. (2019). Influence of GDD in different growth parameters of potato at agroclimatic condition of Jorhat. ~ 247 ~ *The Pharma Innovation Journal*, 8(1), 247–248. [www.thepharmajournal.com](http://www.thepharmajournal.com)
- Barzgar, Z., Towfighi, H., Fathi-Gerdelidani, A., Shahbazi, K., Heidari, A., Etesami, H., Verrillo, M., Savy, D. & Spaccini, R. (2025). Molecular determinants of humic and fulvic acids in enhancing micronutrient availability in calcareous soils: a comparative study on Fe, Mn, Zn, and Cu dynamics. *Scientific Reports*, 15(1), 34142. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06678-3>
- Bo, P., He, Q., Lan, Y., Li, J., Liu, H., Li, X. & Wang, H. (2025). Reducing Mineral Fertilizer Can Improve the Soil Quality and Increase the Wheat Yield and Nutrient Utilization Efficiency: The Fertilizing Effect of Organic–Inorganic Compound Fertilizers. *Agriculture*, 15(12), 1294. <https://doi.org/10.3390/agriculture15121294>
- Canales-Almendares, J. E., Borrego-Escalante, F., Narvaez-Ortíz, W. A., González-Morales, S. & Benavides-Mendoza, A. (2021). Impacto de diferentes fertilizantes en la solución del suelo y el crecimiento de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 26. <https://doi.org/https://www.google.com/url?q=https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2941&sa=D&source=editors&ust=1629945144014000&usg=AOvVaw3uCksXTY5EVswDYtnugq4c>
- Cerón-Lasso, M., Alzate-Arbeláez, A. F., Rojano, B. A. & Ñuztez-Lopez, C. E. (2018). Composición Fisicoquímica y Propiedades Antioxidantes de Genotipos Nativos de Papa Criolla ( *Solanum tuberosum* Grupo Phureja). *Información Tecnológica*, 29(3), 205–216. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000300205>
- Chávez-Díaz, I. F., Zelaya Molina, L. X., Cruz Cárdenas, C. I., Rojas Anaya, E.,

- Ruíz Ramírez, S. & De los Santos Villalobos, S. (2020). Consideraciones sobre el uso de biofertilizantes como alternativa agro- biotecnológica sostenible para la seguridad alimentaria en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1423–1436. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2492>
- David Morales-Fernández, S., Mora-Aguilar, R., Enrique Rodríguez-Pérez, J., Salinas-Moreno, Y., Teresa Colinas-León, M. & Lozoya-Saldaña, H. (2011). Desarrollo y rendimiento de papa en respuesta a la siembra de semilla–tubérculo inmadura. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17(1), 67–75. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1027-152X2011000100011](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2011000100011)
- Ding, Y., Liu, Y., Liu, S., Li, Z., Tan, X., Huang, X., Zeng, G., Zhou, L. & Zheng, B. (2016). Biochar to improve soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(2). <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z>
- Djaman, K., Irmak, S., Koudahe, K. & Allen, S. (2021). Irrigation management in potato (*Solanum tuberosum* L.) production: A review. *Sustainability*, 13(3), 1504. <https://doi.org/10.3390/su13031504>
- Federal Highway Administration. (1977). *MINERAL PROCESSING WASTES (FHWA-RD-97-148)*. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/97148/036.cfm>
- FERTILAB. (2024). *Analisis de hojas*. [www.fertilab.com.mx](http://www.fertilab.com.mx)
- Głąb, T., Gondek, K. & Mierzwa-Hersztek, M. (2024). Impact of Soil Organic Bioregeneration Amendments on Maize Biomass and Soil Physical Quality. *Agriculture*, 14(7), 1020. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071020>
- Gómez, M. I., Magnitskiy, S., Rodríguez, L. E. & Darghan, A. E. (2017). Accumulation of N, P, and K in the tubers of potato (*Solanum tuberosum* L. ssp. andigena) under contrasting soils of the Andean region of Colombia. *Agronomía Colombiana*, 35(1), 59–67. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v35n1.61068>
- Hao, X., Ma, X., Sun, L., Liu, S., Ji, J., Zhou, B., Zhao, Y., Zheng, Y., Kuang, E.,

- Liu, Y. & Zhao, S. (2025). High Ratio of Manure Substitution Enhanced Soil Organic Carbon Storage via Increasing Particulate Organic Carbon and Nutrient Availability. *Plants*, 14(13), 1–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/plants14132045>
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M., Nahar, K., Hossain, M., Mahmud, J., Hossen, M., Masud, A., Moumita & Fujita, M. (2018). Potassium: A Vital Regulator of Plant Responses and Tolerance to Abiotic Stresses. *Agronomy*, 8(3), 31. <https://doi.org/10.3390/agronomy8030031>
- Herrmann, M. N., Wang, K., Wang, Y., Hartung, J., Nkebiwe, P. M., Zhang, W., Chen, X., Müller, T. & Yang, H. (2024). A comprehensive network meta-analysis to assess the benefit of starter fertilization on yield, nutrient uptake and nutrient use efficiency. *European Journal of Agronomy*, 159, 127259. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127259>
- Ierna, A. & Distefano, M. (2024). Crop Nutrition and Soil Fertility Management in Organic Potato Production Systems. *Horticulturae*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/horticulturae10080886>
- Ishfaq, M., Wang, Y., Yan, M., Wang, Z., Wu, L., Li, C. & Li, X. (2022). Physiological Essence of Magnesium in Plants and Its Widespread Deficiency in the Farming System of China. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.802274>
- Kahsay, W. S. (2019). Effects of nitrogen and phosphorus on potatoes production in Ethiopia: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 5(1), 1572985. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1572985>
- López-Rayó, S., Nadal, P. & Lucena, J. J. (2015). Reactivity and effectiveness of traditional and novel ligands for multi-micronutrient fertilization in a calcareous soil. *Frontiers in Plant Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00752>
- Lucas, J., Quintero, V., Vasco, J. & Cuellar, L. (2011). Evaluación De Los Parametros De Calidad Durante La Fritura De Rebanadas De Papa Criolla. *Scientia Et Technica*, XVI(48), 299–304. <https://www.redalyc.org/pdf/849/84922622053.pdf>

- Maciejewska, A., Kuzak, Ł., Sobieraj, J. & Metelski, D. (2024). *Lignite – a natural source of organic matter and its impact on soil health*. Atena Editora. <https://doi.org/10.22533/at.ed.183241809>
- Maffia, A., Marra, F., Canino, F., Battaglia, S., Mallamaci, C., Oliva, M. & Muscolo, A. (2024). Humic Substances from Waste-Based Fertilizers for Improved Soil Fertility. *Agronomy*, 14(11), 2657. <https://doi.org/10.3390/agronomy14112657>
- Meijer Potato. (2025). *Orchestra*. <https://doi.org/https://www.meijerpotato.com/es/variedades/variedades-de-mesa/orchestra/#Caracter%C3%ADsticas>
- Melara, F., da Silva, L. K., Martins Sanderi, D., Dal Castel Krein, D., Strieder Machado, T., Dettmer, A. & Steffanello Piccin, J. (2024). Enhanced efficiency fertilizer: a review on technologies, perspectives, and research strategies. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05468-7>
- Meng, H., Wang, S., Zhang, J., Wang, X., Qiu, C. & Hong, J. (2023). Effects of coal-derived compound fertilizers on soil bacterial community structure in coal mining subsidence areas. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1187572>
- Monroy, J. P., Ramírez, A. K. R., Huerta, A. G., López, D. de J. P. & Sangerman-Jarquín, D. M. (2019). Fertilización orgánica con tres niveles de gallinaza en cuatro cultivares de papa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(5). <https://doi.org/https://www.google.com/url?q=https://doi.org/10.29312/remexca.v10i5.1759&sa=D&ust=1567104397637000>
- Morales-Fernández, S. D., Rafael Mora-Aguilar, R., Salinas-Moreno, Y., Rodríguez-Pérez, J. E., Colinas-León, M. T. & Lozoya-Saldaña, H. (2018). Growth and sugar content of potato tubers in four maturity stages under greenhouse conditions. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, XXIV(1), 53–67. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2016.11.029>
- Narayan, O. P., Kumar, P., Yadav, B., Dua, M. & Johri, A. K. (2023). Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Plant Signaling &*

- Behavior*, 18(1). <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2030082>
- Naumann, M., Koch, M., Thiel, H., Gransee, A. & Pawelzik, E. (2020). The Importance of Nutrient Management for Potato Production Part II: Plant Nutrition and Tuber Quality. *Potato Research*, 63(1), 121–137. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09430-3>
- ONUAA. (2009). *Nueva luz sobre un tesoro enterrado*. 33–44. <http://www.fao.org/potato-2008/pdf/IYPbook-es.pdf>
- Ortiz, O. & Ramirez, R. (2022a). Impact of Low-Rank Coal Addition on the Thermal Conductivity of Sodic Saline Soil. *Información Tecnológica*, 33(4), 53–62. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000400053>
- Ortiz, O. & Ramirez, R. (2022b). Impacto de la adición de carbón de bajo rango en la conductividad térmica del suelo salino sódico. *Información Tecnológica*, 33(4), 53–62. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000400053>
- Otieno, H. M. O. & Mageto, E. K. (2021). A review on yield response to nitrogen, potassium and manure applications in potato (*Solanum tuberosum* L.) production. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 6(1), 80–86. <https://doi.org/10.26832/24566632.2021.0601011>
- Penuelas, J., Coello, F. & Sardans, J. (2023). A better use of fertilizers is needed for global food security and environmental sustainability. *Agriculture and Food Security*, 12(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00409-5>
- Pequerul, A., Pérez, C., Madero, P., Val, J. & Monge, E. (1993). A rapid wet digestion method for plant analysis. In *Optimization of Plant Nutrition* (Vol. 2, pp. 3–6). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-2496-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2496-8_1)
- Pinedo-Taco, R. & Olivas Alvarado, T. (2023). Niveles de absorción de NPK y rendimiento del cultivo de papa en función a la dosis y método de fertilización fraccionada. *Idesia (Arica)*, 41(4), 21–30. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292023000400021>
- PotatoPro. (2025a). *Fianna*. <https://www.potatopro.com/potato-varieties/fianna>
- PotatoPro. (2025b). *Orchestra Potato Variety*. <https://www.potatopro.com/potato-varieties/orchestra>

- Priya, A. K., Alagumalai, A., Balaji, D. & Song, H. (2023). Bio-based agricultural products: a sustainable alternative to agrochemicals for promoting a circular economy. *RSC Sustainability*, 1(4), 746–762. <https://doi.org/10.1039/D3SU00075C>
- Qin, K., Dong, X. & Leskovar, D. I. (2023). Improving tomato nitrogen use efficiency with lignite-derived humic substances. *Scientia Horticulturae*, 321, 112243. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112243>
- Rashid, M., Hussain, Q., Hayat, R., Ahmed, M., Islam, M. S., Soufan, W., Elango, D., Rajendran, K., Iqbal, R., Bhat, T. A. & El Sabagh, A. (2023). Lignite scaffolding as slow-release N-fertilizer extended the SN retention and inhibited N losses in alkaline calcareous soils. *ACS Omega*, 8(25), 22732–22741. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01611>
- Rivera Gonzalez, M. V., Gómez Gómez, L., Cubillos Hinojosa, J. G. & Peralta Castilla, A. (2016). Effect of coal type lignite on growth and production of pigments of *Arthrospira platensis*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1), 73–80. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49994>
- Rodríguez-Yzquierdo, A.G., Pradenas-Aguila, H. E., Basso-de-Figuera, C. A., Barrios-García, M., León-Pacheco, R. I. & Pérez-Macias, M. (2020). Efecto de dosis de nitrógeno en la agronomía y fisiología de plantas de maracuyá. *Agronomía Mesoamericana*, 31(117–128).
- Rodriguez, L. E. (2010). Origen y evolución de la papa cultivada. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 28(1), 9–17. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-99652010000100002](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652010000100002)
- Rojas, R. E. M. (2022). “Efectos del secado y fritura en las características organolépticas de hojuelas fritas de papa (*Solanum tuberosum*) variedad Canchan” [Universidad Nacional de Cajamarca]. [https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/5457/TESIS\\_FINAL - Sheyla Areli Terrones Carrera.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/5457/TESIS_FINAL_-_Sheyla_Areli_Terrones_Carrera.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Sai, R. & Paswan, S. (2024). Influence of higher levels of NPK fertilizers on growth, yield, and profitability of three potato varieties in Surma, Bajhang,

- Nepal. *Heliyon*, 10(14). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34601>
- Saidi, A. & Hajjibarat, Z. (2021). Phytohormones: plant switchers in developmental and growth stages in potato. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 19(1), 89. <https://doi.org/10.1186/s43141-021-00192-5>
- Sanzo-Miró, M., Simms, D. M., Rezwani, F. I., Terry, L. A. & Alamar, M. C. (2023). An integrated approach to control and manage potato black dot disease: A review. *American Journal of Potato Research*, 100(5), 362–370. <https://doi.org/10.1007/s12230-023-09924-4>
- Secretaría de Minería. (2017). *Perfil de mercado de carbón*. 1–6. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287796/Perfil\\_Carbon\\_\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287796/Perfil_Carbon__2017.pdf)
- Servicio Geológico Mexicano. (2019). *¿Qué es el Carbón Mineral?* 1–5. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157798/Que-es-el-carbon-mineral.pdf>
- Sifuentes Ibarra, E., Ruelas Islas, J. D. R., Macías Cervantes, J., Talamantes Castorena, I., Palacios Mondaca, C. A. & Valenzuela López, B. E. (2015). Fenología y tiempo en el manejo del riego y fertilización del cultivo de papa. *BIOtecnia*, 17(3), 42. <https://doi.org/10.18633/bt.v17i3.218>
- SIN. (2012). *Ficha técnica de minería*. [https://aplicaciones2.ecuadorencifras.gob.ec/SIN/co\\_mineria.php?id=11040.00.00](https://aplicaciones2.ecuadorencifras.gob.ec/SIN/co_mineria.php?id=11040.00.00)
- Singh, Baljeet, Sharma, J., Bhardwaj, V., Sood, S., Siddappa, S., Goutam, U., Dalamu, Kardile, H. B., Kumar, D. & Kumar, V. (2022). Genotypic variations for tuber nutrient content, dry matter and agronomic traits in tetraploid potato germplasm. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 28(6), 1233–1248. <https://doi.org/10.1007/s12298-022-01197-1>
- Singh, Brajesh & Buckseth, T. (2024). Role of potato in entrepreneurship development. *Indian J. Plant Genet. Resour*, 37(2), 189–194. <https://doi.org/10.61949/0976-1926.2024.v37i02.01>
- Solek-Podwika, K., Ciarkowska, K. & Filipek-Mazur, B. (2023). Soil amendment with a lignite-derived humic substance affects soil properties and biomass

- maize yield. *Sustainability*, 15(3), 2304. <https://doi.org/10.3390/su15032304>
- Symanowicz, B. & Toczko, R. (2023). Brown Coal Waste in Agriculture and Environmental Protection: A Review. *Sustainability*, 15(18), 13371. <https://doi.org/10.3390/su151813371>
- Taha, A. M. (2022). *Fertigation: A Pathway to Sustainable Food Production*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-05596-6>
- Torabian, S., Farhangi-Abriz, S., Qin, R., Noulas, C., Sathuvalli, V., Charlton, B. & Loka, D. A. (2021). Potassium: A Vital Macronutrient in Potato Production—A Review. *Agronomy*, 11(3), 543. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030543>
- Valero, N. O., Salgado, J. A. & Bastidas, M. J. (2018). Carbones de Bajo Rango como Recurso para Enmiendas Húmicas mediante Transformación Microbiana. *Información Tecnológica*, 29(5), 315–324. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000500315>
- Valero, N. O., Salgado, J. A. & Corzo, D. (2018). Simple Methodology for Evaluating the Bioactivity of Humic Acids Obtained from Lignite via Alkaline Extraction and Carbon-Solubilizing Bacteria. *Información Tecnológica*, 29(4), 75–82. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000400075>
- van de Vossenberg, B. T. L. H., Prodhomme, C., Vossen, J. H. & van der Lee, T. A. J. (2022). *Synchytrium endobioticum*, the potato wart disease pathogen. *Molecular Plant Pathology*, 23(4), 461–474. <https://doi.org/10.1111/mpp.13183>
- Vásquez-Castillo, W., Sevilla Rivadeneira, A., Rivadeneira Ruales, J. & Cuesta-Subía, X. (2022). Resistencia genética como estrategia para el control de *Phytophthora infestans* en papa (*Solanum tuberosum*). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(2). [https://doi.org/10.21930/rcta.vol23\\_num2\\_art:2292](https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num2_art:2292)
- Veobides-Amador, H., Guridi Izquierdo, F. & VázquezPadrón, V. (2018). Las sustancias húmicas como bioestimulantes de plantas bajo condiciones de estrés ambiental. *Cultivos Tropicales*, 39(4), 102–109. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-)

59362018000400015&lng=es&tlng=es.

- Vignola, R., Watler, W., Vargas Céspedes, A. & Morales, M. (2017). Ficha técnica: Cultivo de Papa. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-INTA*, 1–78. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/reduccion-impacto-por-eventos-climaticos/Informe-final-papa.pdf>
- Wadas, W. & Dziugieł, T. (2020). Changes in Assimilation Area and Chlorophyll Content of Very Early Potato (*Solanum tuberosum* L.) Cultivars as Influenced by Biostimulants. *Agronomy*, 10(3), 387. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030387>
- White, P. J. (2015). *Handbook of Plant Nutrition Second Edition* (D. J. Barker, A. V.; Pilbeam (ed.); 2nd ed.).
- White, Philip J., Bradshaw, J. E., Finlay, M., Dale, B., Ramsay, G., Hammond, J. P. & Broadley, M. R. (2009). Relationships between yield and mineral concentrations in potato tubers. *HortScience*, 44(1), 6–11. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.1.6>
- Wimmer, M. A., Gupta, U. C. & Goldberg, S. R. (2015). *Handbook of Plant Nutrition. 2nd edition* (2nd ed., pp. 305–345). Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Xu, F., Meng, A., Liu, Y., Li, J. & Wu, N. (2025). Effects of New Special Formula Fertilizer on Potato Growth, Yield, and Fertilizer Utilization Efficiency. *Plants*, 14(4), 627. <https://doi.org/10.3390/plants14040627>
- Yang, Y., Wang, H., Yao, C., Feng, Y., Kong, Y., Fahad, S., Riaz, U., Liu, H., Zaman, Q. uz, Sultan, K. & Deng, G. (2025). Enhancing potato growth and quality through macronutrient and zinc fertilization: a field-based study on osmolyte responses and quality trait. *Discover Sustainability*, 6(1), 438. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01286-7>
- Zarzyńska, K., Trawczyński, C. & Pietraszko, M. (2023). Environmental and Agronomical Factors Limiting Differences in Potato Yielding between Organic and Conventional Production System. *Agriculture (Switzerland)*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/agriculture13040901>
- Zezelew, D. Z., Lal, S., Kidane, T. T. & Ghebresslassie, B. M. (2016). Effect of



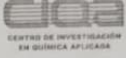
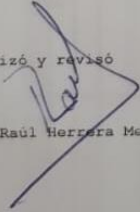

Potassium Levels on Growth and Productivity of Potato Varieties. *American Journal of Plant Sciences*, 07(12), 1629–1638. <https://doi.org/10.4236/ajps.2016.712154>

Zhang, S., Wang, X., Kinay, P. & Dau, Q. (2024). Climate change impacts on potato storage. *Foods*, 13(7), 1119. <https://doi.org/10.3390/foods13071119>

Zheng, H.-J., Zhang, S.-Y., Guo, X., Lu, J.-F., Dong, A.-X., Deng, W.-X., Tang, W.-J., Zhao, M.-H. & Jin, T. (2014). An experimental study on the drying kinetics of lignite in high temperature nitrogen atmosphere. *Fuel Processing Technology*, 126, 259–265. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.05.009>

## ANEXOS

## Anexo 1. Análisis del carbón lignito

 <b>Gobierno de México</b>	 <b>CONAHCYT</b> <small>CONSEJO NACIONAL DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS</small>	 <b>CIQA</b> <small>CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA</small>									
<b>SERVICIOS AMBIENTALES</b>											
<b>ANÁLISIS ELEMENTAL DE MATERIALES COMBUSTIBLES</b>											
<b>INFORME DE RESULTADOS</b>											
No. De Informe: CIQA-SA-08-2024 Hoja 1 de 1											
Clase de muestra: Lignito Cliente: UAAAN At'n: Dr Héctor M. castillo Soto Origen de la muestra: Presentada por el cliente											
Fecha de recepción de la muestra: 2024/18/01											
Fecha (s) de realización de prueba: 2024/01/02 a 2024/21/03											
Fecha de elaboración de informe: 2024/25/03											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">MUESTRA</th> <th style="text-align: center;">%C</th> <th style="text-align: center;">%H2O (humedad)</th> <th style="text-align: center;">%Ceniza</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lignito</td> <td style="text-align: center;">67.1</td> <td style="text-align: center;">13.1</td> <td style="text-align: center;">16.9</td> </tr> </tbody> </table>	MUESTRA	%C	%H2O (humedad)	%Ceniza	Lignito	67.1	13.1	16.9			
MUESTRA	%C	%H2O (humedad)	%Ceniza								
Lignito	67.1	13.1	16.9								
<p>Nota:</p> <p>Análisis de carbono por el método de Combustión y Detección IR en un equipo marca Leco modelo CHN628.</p> <p>Humedad por secado a 105°C en estufa de secado.</p> <p>Ceniza por calcinación en mufla a 900°C</p> <p>El Carbono y la ceniza se determinaron en la muestra original, sin secar.</p> <p>Las pruebas no se encuentran acreditadas.</p> <p style="margin-top: 20px;">Realizó y revisó</p> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">         Ing Raúl Herrera Mendoza     </div>											
<p style="font-size: small;">Blvd. Enrique Reyna Hermosillo No. 140, San José de los Cerros, CP. 25294, Saltillo, Coah., México. Tel: (844) 430 9830 www.ciqa.mx</p> <div style="text-align: right; margin-top: 10px;">  <p><b>2024</b> Felipe Carrillo PUERTO</p> </div>											

## Anexo 2. Análisis del suelo antes de la siembra



## ANÁLISIS COMPLETO DE SUELO

Fecha de emisión: 12/03/2024 Folio Informe: 005424

Datos del Cliente				
Cliente:	COMPO EXPERT MEXICO		Zona de Muestreo:	EJIDO EL TOKIO
Solicitado por:	FRANCISCO AVILA	francisco.avila@compo-expert.com	Ubicación:	GALEANA Galeana, Nuevo Leon
Folio Servicio:	24030386		Fecha Recepción:	07/03/2024

Identificación de la muestra				
Folio de Muestra	NT-24030386-1236		Fecha Toma de Muestra	06/03/2024
Tipo de Muestra	SUELO		LOTE	GOTEO
SECTOR	JOSE EMILIO CARDENAS DAVILA		CULTIVO	PAPA
PROFUNDIDAD (cm)	0-30			

Resultados				
Parametros Fisicos	Resultado			Niveles
pH (Extracto de Pasta Saturada)	7.91			6.0 - 7.5
Conductividad Eléctrica mS/cm (Electrométrico)	4.92			1.5 - 2.5 mS/cm
Relación de Absorción de Sodio	0.47			< 5
Porcentaje Sodio Intercambiable (%)	0.10			
Porcentaje de Saturación (%)	51.30			
Materia Orgánica (%)	2.88			
Capacidad de Campo	27.40			
Punto de Marchitez Permanente	16.30			
Textura	Franco-Limosa			
Arcilla (%)	7.00			
Arena (%)	25.00			
Limo (%)	68.00			
pH 1:1(H <sub>2</sub> O)	7.59			6.0 - 7.5
Aniones (-) Fertilidad	ppm			Nivel
Nitrógeno Nítrico (N-NO <sub>3</sub> ) (Brusina)	59.20			20 - 40 ppm
Fosforo de Fosfatos P-PO <sub>4</sub> (Olsen)	2.40			20 - 30 ppm
Azufre de Sulfatos S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (Turbidimétrico)	10,120.00			60 - 100 ppm
Cationes (+) de intercambio (Cationes Fertilidad)	ppm	Meq/100 gr.	% Base Saturada	Niveles
Sodio Na <sup>+</sup> (Ac. NH <sub>4</sub> pH 7.0)	67.00	0.29	0.35	< 150 ppm
Potasio K <sup>+</sup> (Ac. NH <sub>4</sub> pH 7.0)	780.00	1.99	2.40	100 - 250 ppm
Calcio Ca <sup>2+</sup> (Ac. NH <sub>4</sub> pH 7.0)	15,800.00	79.00	95.23	1500 - 3500 ppm
Magnesio Mg <sup>2+</sup> (Ac. NH <sub>4</sub> pH 7.0)	210.00	1.67	2.02	200-500 ppm
Capacidad de Intercambio Catiónico	82.96			
Aniones (-) Extracto Saturado	ppm	Meq/L	Mmol/L	Niveles
Nitratos NO <sub>3</sub> (UV)	409.20	6.60	6.60	3 - 8 Meq/L
Fosforo de fosfatos	0.64	0.02	0.02	3 - 5 ppm
Fosfato Diácido H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (Morgan)	2.00	0.02	0.02	
Sulfatos SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (Turbidimétrico)	1,491.33	31.05	15.53	3 - 6 Meq/L
Carbonatos CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (Titulación)	0.00	0.00	0.00	0 Meq/L
Bicarbonatos HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Titulación)	280.65	4.60	4.60	0.5 - 3.0 Meq/L
Cloruros Cl <sup>-</sup> (Mohr)	241.06	6.80	6.80	< 10.0 Meq/L
Suma de Aniones		49.07		
Cationes (+) Extracto Saturado	ppm	Meq/L	Mmol/L	Niveles
Sodio Na <sup>+</sup> (Soluble A. Atómica)	51.00	2.22	2.22	< 10.0 Meq/L
Potasio K <sup>+</sup> (Soluble A. Atómica)	88.00	2.25	2.25	1.5 - 3.0 Meq/L
Calcio Ca <sup>2+</sup> (Soluble A. Atómica)	800.00	39.92	19.96	4.0 - 10.0 Meq/L
Magnesio Mg <sup>2+</sup> (Soluble A. Atómica)	66.00	5.43	2.72	2.0 - 5.0 Meq/L
Suma de Cationes		49.82		

Microelementos	ppm	μmol/L	Niveles
Fierro Fe <sup>+2</sup> (DTPA)	2.10	37.61	5 - 30 ppm
Zinc Zn <sup>+2</sup> (DTPA)	1.20	18.35	3 - 10 ppm
Cobre Cu <sup>+2</sup> (DTPA)	0.80	12.59	0.8 - 3 ppm
Manganeso Mn <sup>+4</sup> (DTPA)	4.10	74.64	5 - 15 ppm
Boro B <sup>+3</sup> (Azometina-H)	0.73	67.53	0.3 - 1.5 ppm

Relación Nutricional	Meq/L	Nivel
NO <sub>3</sub> /K+	2.93	1.5 - 2.5 Meq/L
K+/Ca++	0.06	0.3 - 0.5 Meq/L
Ca++/Mg++	7.35	2.0 - 2.5 Meq/L
K+/Mg++	0.41	0.5 - 0.75 Meq/L

Observaciones
Verificado conc. de S-SO4.

Nota: Los resultados emitidos únicamente avalan la(s) muestra(s) analizada(s) en el presente laboratorio. Se prohíbe reproducir total o parcialmente la información sin previa autorización.

  
**Q.F.B. FLOR PATRICIA DURAN**  
 Responsable de Laboratorio



## Anexo 3. Análisis del suelo después de la siembra



**FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.**  
Poniente 6 No. 200, Ciudad Industrial, Celaya, Gto. C.P. 38010  
www.fertilab.com.mx

Laboratorio de Análisis de Suelos y Nutrición



FOR-PO-01  
Emisión: 2024-02-09  
Revisión: 05

### INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYO FOLIO: SU-244808

<b>Productor:</b> Universidad	<b>Tipo de agricultura:</b> Riego
<b>Correo Productor:</b>	<b>Cultivo a Establecer:</b> Papa
<b>Localización muestra:</b> Tokyo, Galeana, Nuevo Leon	<b>Prof. Muestra:</b> 0-30 cm
<b>Coordenadas:</b> 25.5131648, -100.9516544	<b>Peso Muestra:</b> 1068
<b>Predio / ID:</b> Goteo / T1	<b>Fecha de recepción:</b> 2024/12/19
<b>Cliente:</b> Hector Manuel Castillo Soto	<b>Fecha de ejecución:</b> 2024/12/26
<b>Correo Cliente:</b> castillo36_36@hotmail.com	<b>Fecha de emisión:</b> 2025/01/06

Propiedades Físicas del Suelo			
Clase Textural	Franco Arcilloso		
<sup>1</sup> Punto de Saturación	50.0	%	Mod. Alto
<sup>1</sup> Capacidad de Campo	26.7	%	Mod. Alto
<sup>1</sup> Punto March. Perm.	15.9	%	Mod. Alto
<sup>1</sup> Cond. Hidráulica	1.70	cm/hr	Bajo
<sup>1</sup> Dens. Aparente	1.16	g/cm <sup>3</sup>	

pH del Suelo y Necesidades de Yeso, Cal y Lavado			
<sup>1</sup> pH (1:2 agua)	7.67		Mod. alcalino
<sup>1</sup> pH Buffer	NA		
<sup>1</sup> Carbonatos Totales (%)	24.7	%	Mod. Alto
<sup>1</sup> Salinidad (CE Extracto)	4.80	dS/m	Requieren de Lavado
Requerimiento de Yeso	No Requiere		
Requerimiento de Cal	No Requiere		

Fertilidad del Suelo									
Det.	Result.	Unidad	Muy Bajo	Bajo	Mod. Bajo	Med.	Mod. Alto	Alto	Muy Alto
<sup>1</sup> MO	2.35	% (p/p)	[Bar chart showing high fertility]						
<sup>1</sup> P-Olsen	16.6	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]						
<sup>2</sup> K	273	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]						
<sup>2</sup> Ca	13797	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]						
<sup>2</sup> Mg	104	mg/kg	[Bar chart showing low to moderate fertility]						
<sup>2</sup> Na *	57.3	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]						
<sup>3</sup> Fe	0.82	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]						
<sup>3</sup> Zn	0.77	mg/kg	[Bar chart showing low to moderate fertility]						
<sup>3</sup> Mn	0.81	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]						
<sup>3</sup> Cu	0.14	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]						
<sup>1</sup> B	1.08	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]						
<sup>1</sup> S	16395	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]						
<sup>1</sup> N-NO <sub>3</sub>	58.6	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]						

Cationes Intercambiables Porcentaje de saturación de bases							
	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto		
% Sat	97.5	1.20	0.99	0.35	NA	NA	
meq/100g	68.8	0.85	0.70	0.25	NA	NA	70.6
Cación	<sup>2</sup> Ca	<sup>2</sup> Mg	<sup>2</sup> K	<sup>2</sup> Na*	<sup>1</sup> Al*	<sup>1</sup> H*	CIC

Relación entre cationes (Basadas en meq/100g)				
Relación	Ca/K	Mg/K	Ca+Mg/K	Ca/Mg
Resultados	98.3	1.23	99.5	80.0
Interpretación	Muy Alto	Bajo	Muy Alto	Muy Alto

\* Es deseable que estos elementos tengan un bajo contenido

PND = Pendiente por verificar NA = No analizado ND = Sin datos



**FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.**  
 Poniente 6 No. 200, Ciudad Industrial, Celaya, Gto. C.P. 38010  
 www.fertilab.com.mx



Laboratorio de Análisis de Suelos y Nutrición

INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYO				FOLIO: SU-244807																																																																																																																																																																							
<b>Productor:</b> Universidad <b>Correo Productor:</b> <b>Localización muestra:</b> Tokyo, Galeana, Nuevo Leon <b>Coordenadas:</b> 25.5131648, -100.9516544 <b>Predio / ID:</b> Goteo / T2 <b>Cliente:</b> Hector Manuel Castillo Soto <b>Correo Cliente:</b> castillo36_36@hotmail.com				<b>Tipo de agricultura:</b> Riego <b>Cultivo a Establecer:</b> Papa <b>Prof. Muestra:</b> 0-30 cm <b>Peso Muestra:</b> 1005 <b>Fecha de recepción:</b> 2024/12/19 <b>Fecha de ejecución:</b> 2024/12/26 <b>Fecha de emisión:</b> 2025/01/06																																																																																																																																																																							
<b>Propiedades Físicas del Suelo</b> Clase Textural Franco Arcilloso <sup>1</sup> Punto de Saturación 50.0 % Mod. Alto <sup>1</sup> Capacidad de Campo 26.7 % Mod. Alto <sup>1</sup> Punto March. Perm. 15.9 % Mod. Alto <sup>1</sup> Cond. Hidráulica 1.70 cm/hr Bajo <sup>1</sup> Dens. Apparente 0.93 g/cm <sup>3</sup>				<b>pH del Suelo y Necesidades de Yeso, Cal y Lavado</b> <sup>1</sup> pH (1:2 agua) 7.64 Mod. alcalino <sup>1</sup> pH Buffer NA <sup>1</sup> Carbonatos Totales (%) 35.9 % Alto <sup>1</sup> Salinidad (CE Extracto) 4.41 dS/m Requieren de Lavado Requerimiento de Yeso No Requiere Requerimiento de Cal No Requiere																																																																																																																																																																							
<b>4 Fertilidad del Suelo</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Det.</th> <th>Result.</th> <th>Unidad</th> <th>Muy Bajo</th> <th>Bajo</th> <th>Mod. Bajo</th> <th>Med.</th> <th>Mod. Alto</th> <th>Alto</th> <th>Muy Alto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><sup>1</sup>MO</td> <td>2.87</td> <td>% (p/p)</td> <td colspan="7">[Bar chart showing high fertility]</td> </tr> <tr> <td><sup>1</sup>P- Olsen</td> <td>20.4</td> <td>mg/kg</td> <td colspan="7">[Bar chart showing high fertility]</td> </tr> <tr> <td><sup>2</sup>K</td> <td>287</td> <td>mg/kg</td> <td colspan="7">[Bar chart showing high fertility]</td> </tr> <tr> <td><sup>2</sup>Ca</td> <td>13956</td> <td>mg/kg</td> <td colspan="7">[Bar chart showing high fertility]</td> </tr> <tr> <td><sup>2</sup>Mg</td> <td>106</td> <td>mg/kg</td> <td colspan="7">[Bar chart showing moderate fertility]</td> </tr> <tr> <td><sup>2</sup>Na *</td> <td>42.8</td> <td>mg/kg</td> <td colspan="7">[Bar chart showing low fertility]</td> </tr> <tr> <td><sup>3</sup>Fe</td> <td>1.26</td> <td>mg/kg</td> <td colspan="7">[Bar chart showing low fertility]</td> </tr> <tr> <td><sup>2</sup>Zn</td> <td>0.80</td> <td>mg/kg</td> <td colspan="7">[Bar chart showing moderate fertility]</td> </tr> <tr> <td><sup>3</sup>Mn</td> <td>0.90</td> <td>mg/kg</td> <td colspan="7">[Bar chart showing low fertility]</td> </tr> <tr> <td><sup>3</sup>Cu</td> <td>0.14</td> <td>mg/kg</td> <td colspan="7">[Bar chart showing low fertility]</td> </tr> <tr> <td><sup>1</sup>B</td> <td>1.15</td> <td>mg/kg</td> <td colspan="7">[Bar chart showing moderate fertility]</td> </tr> <tr> <td><sup>1</sup>S</td> <td>17240</td> <td>mg/kg</td> <td colspan="7">[Bar chart showing high fertility]</td> </tr> <tr> <td><sup>1</sup>N-NO<sub>3</sub></td> <td>43.2</td> <td>mg/kg</td> <td colspan="7">[Bar chart showing moderate fertility]</td> </tr> </tbody> </table>				Det.	Result.	Unidad	Muy Bajo	Bajo	Mod. Bajo	Med.	Mod. Alto	Alto	Muy Alto	<sup>1</sup> MO	2.87	% (p/p)	[Bar chart showing high fertility]							<sup>1</sup> P- Olsen	20.4	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]							<sup>2</sup> K	287	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]							<sup>2</sup> Ca	13956	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]							<sup>2</sup> Mg	106	mg/kg	[Bar chart showing moderate fertility]							<sup>2</sup> Na *	42.8	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							<sup>3</sup> Fe	1.26	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							<sup>2</sup> Zn	0.80	mg/kg	[Bar chart showing moderate fertility]							<sup>3</sup> Mn	0.90	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							<sup>3</sup> Cu	0.14	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							<sup>1</sup> B	1.15	mg/kg	[Bar chart showing moderate fertility]							<sup>1</sup> S	17240	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]							<sup>1</sup> N-NO <sub>3</sub>	43.2	mg/kg	[Bar chart showing moderate fertility]							<b>4 Cationes Intercambiables</b> Porcentaje de saturación de bases <table border="1"> <thead> <tr> <th>Catión</th> <th>% Sat</th> <th>meq/100g</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><sup>2</sup>Ca</td> <td>97.5</td> <td>89.6</td> </tr> <tr> <td><sup>2</sup>Mg</td> <td>1.22</td> <td>0.87</td> </tr> <tr> <td><sup>2</sup>K</td> <td>1.02</td> <td>0.73</td> </tr> <tr> <td><sup>2</sup>Na*</td> <td>0.27</td> <td>0.19</td> </tr> <tr> <td><sup>1</sup>Al*</td> <td>NA</td> <td>NA</td> </tr> <tr> <td><sup>1</sup>H*</td> <td>NA</td> <td>NA</td> </tr> <tr> <td>CIC</td> <td>71.4</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Catión	% Sat	meq/100g	<sup>2</sup> Ca	97.5	89.6	<sup>2</sup> Mg	1.22	0.87	<sup>2</sup> K	1.02	0.73	<sup>2</sup> Na*	0.27	0.19	<sup>1</sup> Al*	NA	NA	<sup>1</sup> H*	NA	NA	CIC	71.4	
Det.	Result.	Unidad	Muy Bajo	Bajo	Mod. Bajo	Med.	Mod. Alto	Alto	Muy Alto																																																																																																																																																																		
<sup>1</sup> MO	2.87	% (p/p)	[Bar chart showing high fertility]																																																																																																																																																																								
<sup>1</sup> P- Olsen	20.4	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]																																																																																																																																																																								
<sup>2</sup> K	287	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]																																																																																																																																																																								
<sup>2</sup> Ca	13956	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]																																																																																																																																																																								
<sup>2</sup> Mg	106	mg/kg	[Bar chart showing moderate fertility]																																																																																																																																																																								
<sup>2</sup> Na *	42.8	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]																																																																																																																																																																								
<sup>3</sup> Fe	1.26	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]																																																																																																																																																																								
<sup>2</sup> Zn	0.80	mg/kg	[Bar chart showing moderate fertility]																																																																																																																																																																								
<sup>3</sup> Mn	0.90	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]																																																																																																																																																																								
<sup>3</sup> Cu	0.14	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]																																																																																																																																																																								
<sup>1</sup> B	1.15	mg/kg	[Bar chart showing moderate fertility]																																																																																																																																																																								
<sup>1</sup> S	17240	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]																																																																																																																																																																								
<sup>1</sup> N-NO <sub>3</sub>	43.2	mg/kg	[Bar chart showing moderate fertility]																																																																																																																																																																								
Catión	% Sat	meq/100g																																																																																																																																																																									
<sup>2</sup> Ca	97.5	89.6																																																																																																																																																																									
<sup>2</sup> Mg	1.22	0.87																																																																																																																																																																									
<sup>2</sup> K	1.02	0.73																																																																																																																																																																									
<sup>2</sup> Na*	0.27	0.19																																																																																																																																																																									
<sup>1</sup> Al*	NA	NA																																																																																																																																																																									
<sup>1</sup> H*	NA	NA																																																																																																																																																																									
CIC	71.4																																																																																																																																																																										
<b>Relación entre cationes (Basadas en meq/100g)</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Relación</th> <th>Ca/K</th> <th>Mg/K</th> <th>Ca+Mg/K</th> <th>Ca/Mg</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Resultados</td> <td>95.3</td> <td>1.19</td> <td>96.5</td> <td>80.0</td> </tr> <tr> <td>Interpretación</td> <td>Muy Alto</td> <td>Bajo</td> <td>Muy Alto</td> <td>Muy Alto</td> </tr> </tbody> </table>				Relación	Ca/K	Mg/K	Ca+Mg/K	Ca/Mg	Resultados	95.3	1.19	96.5	80.0	Interpretación	Muy Alto	Bajo	Muy Alto	Muy Alto																																																																																																																																																									
Relación	Ca/K	Mg/K	Ca+Mg/K	Ca/Mg																																																																																																																																																																							
Resultados	95.3	1.19	96.5	80.0																																																																																																																																																																							
Interpretación	Muy Alto	Bajo	Muy Alto	Muy Alto																																																																																																																																																																							

\* Es deseable que estos elementos tengan un bajo contenido

PND = Pendiente por verificar NA = No analizado ND = Sin datos



**FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.**  
 Poniente 6 No. 200, Ciudad Industrial, Celaya, Gto. C.P. 38010  
 www.fertilab.com.mx

Laboratorio de Análisis de Suelos y Nutrición



FOR-PO-01  
 Emisión: 2024-02-09  
 Revisión: 05  
 ISO 9001  
 NAFPT  
 2023

INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYO				FOLIO: SU-244803						
<b>Productor:</b> Universidad		<b>Tipo de agricultura:</b> Riego		<b>Correo Productor:</b>		<b>Cultivo a Establecer:</b> Papa				
<b>Localización muestra:</b> , Galeana, Nuevo Leon		<b>Prof. Muestra:</b> 0-30 cm		<b>Peso Muestra:</b> 1106		<b>Fecha de recepción:</b> 2024/12/19				
<b>Coordenadas:</b> 25.5131648, -100.9516544		<b>Fecha de ejecución:</b> 2024/12/26		<b>Fecha de emisión:</b> 2025/01/06						
<b>Predio / ID:</b> Goteo / T3										
<b>Cliente:</b> Hector Manuel Castillo Soto										
<b>Correo Cliente:</b> castillo36_36@hotmail.com										
<b>Propiedades Físicas del Suelo</b>				<b>pH del Suelo y Necesidades de Yeso, Cal y Lavado</b>						
Clase Textural		Franco Arcilloso		<sup>1</sup> pH (1:2 agua)		7.44 Mod. alcalino				
<sup>1</sup> Punto de Saturación		46.0 % Mod. Alto		<sup>1</sup> pH Buffer		NA				
<sup>1</sup> Capacidad de Campo		24.5 % Mod. Alto		<sup>1</sup> Carbonatos Totales (%)		24.7 % Mod. Alto				
<sup>1</sup> Punto March. Perm.		14.6 % Mod. Alto		<sup>1</sup> Salinidad (CE Extracto)		4.35 dS/m Requieren de Lavado				
<sup>1</sup> Cond. Hidráulica		2.40 cm/hr Mod. Bajo		Requerimiento de Yeso		No Requiere				
<sup>1</sup> Dens. Aparente		1.07 g/cm <sup>3</sup>		Requerimiento de Cal		No Requiere				
<b><sup>4</sup> Fertilidad del Suelo</b>				<b><sup>4</sup> Cationes Intercambiables</b>						
Det.	Result.	Unidad	Muy Bajo	Bajo	Mod. Bajo	Med.	Mod. Alto	Alto	Muy Alto	
<sup>1</sup> MO	2.89	% (p/p)								
<sup>1</sup> P-Olsen	18.6	mg/kg								
<sup>2</sup> K	273	mg/kg								
<sup>2</sup> Ca	13546	mg/kg								
<sup>2</sup> Mg	91.7	mg/kg								
<sup>2</sup> Na *	35.8	mg/kg								
<sup>3</sup> Fe	1.22	mg/kg								
<sup>3</sup> Zn	0.86	mg/kg								
<sup>3</sup> Mn	0.92	mg/kg								
<sup>3</sup> Cu	0.14	mg/kg								
<sup>1</sup> B	1.21	mg/kg								
<sup>1</sup> S	17451	mg/kg								
<sup>1</sup> N-NO <sub>3</sub>	23.3	mg/kg								
<b>Relación entre cationes (Basadas en meq/100g)</b>				<b>Porcentaje de saturación de bases</b>						
Relación	Ca/K	Mg/K	Ca+Mg/K	Ca/Mg						
Resultados	96.6	1.07	97.6	90.1						
Interpretación	Muy Alto	Bajo	Muy Alto	Muy Alto						
% Sat	97.7	1.10	1.01	0.23	NA	NA				
meq/100g	67.6	0.78	0.70	0.16	NA	NA	69.2			
Catión	<sup>2</sup> Ca	<sup>2</sup> Mg	<sup>2</sup> K	<sup>2</sup> Na*	<sup>1</sup> Al*	<sup>1</sup> H*	CIC			

\* Es deseable que estos elementos tengan un bajo contenido

PND = Pendiente por verificar NA = No analizado ND = Sin datos



**FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.**  
Poniente 6 No. 200, Ciudad Industrial, Celaya, Gto. C.P. 38010  
www.fertilab.com.mx

Laboratorio de Análisis de Suelos y Nutrición



FOR-PO-01  
Emisión: 2024-02-09  
Revisión: 05

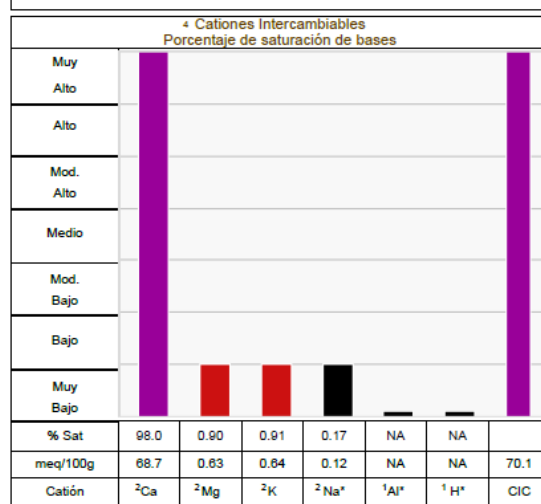
**INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYO** **FOLIO: SU-244804**

<b>Productor:</b> Universidad	<b>Tipo de agricultura:</b> NA
<b>Correo Productor:</b>	<b>Cultivo a Establecer:</b> Papa
<b>Localización muestra:</b> Tokyo, Galeana, Nuevo Leon	<b>Prof. Muestra:</b> 0-30 cm
<b>Coordenadas:</b> 25.5131648, -100.9516544	<b>Peso Muestra:</b> 1019
<b>Predio / ID:</b> Goteo / T4	<b>Fecha de recepción:</b> 2024/12/19
<b>Cliente:</b> Hector Manuel Castillo Soto	<b>Fecha de ejecución:</b> 2024/12/26
<b>Correo Cliente:</b> castillo36_36@hotmail.com	<b>Fecha de emisión:</b> 2025/01/06

Propiedades Físicas del Suelo			
Clase Textural	Franco Arcilloso		
<sup>1</sup> Punto de Saturación	52.0	%	Alto
<sup>1</sup> Capacidad de Campo	27.8	%	Alto
<sup>1</sup> Punto March. Perm.	16.5	%	Alto
<sup>1</sup> Cond. Hidráulica	1.50	cm/hr	Bajo
<sup>1</sup> Dens. Aparente	1.04	g/cm <sup>3</sup>	

pH del Suelo y Necesidades de Yeso, Cal y Lavado			
<sup>1</sup> pH (1:2 agua)	7.58		Mod. alcalino
<sup>1</sup> pH Buffer	NA		
<sup>1</sup> Carbonatos Totales (%)	27.5	%	Alto
<sup>1</sup> Salinidad (CE Extracto)	4.41	dS/m	Requieren de Lavado
Requerimiento de Yeso	No Requiere		
Requerimiento de Cal	No Requiere		

* Fertilidad del Suelo										
Det.	Result.	Unidad	Muy Bajo	Bajo	Mod. Bajo	Med.	Mod. Alto	Alto	Muy Alto	
<sup>1</sup> MO	2.93	% (p/p)	[Bar chart showing high fertility]							
<sup>1</sup> P-Olsen	20.4	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]							
<sup>2</sup> K	249	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]							
<sup>2</sup> Ca	13759	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]							
<sup>2</sup> Mg	77.1	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							
<sup>2</sup> Na *	27.9	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							
<sup>3</sup> Fe	1.16	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							
<sup>3</sup> Zn	0.84	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							
<sup>3</sup> Mn	0.92	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							
<sup>3</sup> Cu	0.16	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							
<sup>1</sup> B	1.18	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							
<sup>1</sup> S	17409	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]							
<sup>1</sup> N-NO <sub>3</sub>	27.1	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]							



Relación entre cationes (Basadas en meq/100g)				
Relación	Ca/K	Mg/K	Ca+Mg/K	Ca/Mg
Resultados	107	0.98	108	109
Interpretación	Muy Alto	Muy Bajo	Muy Alto	Muy Alto

\* Es deseable que estos elementos tengan un bajo contenido

PND = Pendiente por verificar NA = No analizado ND = Sin datos



**FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.**  
 Poniente 6 No. 200, Ciudad Industrial, Celaya, Gto. C.P. 38010  
 www.fertilab.com.mx

Laboratorio de Análisis de Suelos y Nutrición



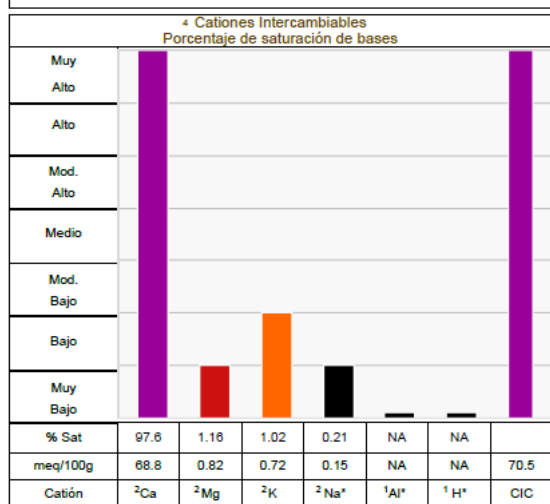
**INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYO** **FOLIO: SU-244805**

<b>Productor:</b>	Universidad	<b>Tipo de agricultura:</b>	Riego
<b>Correo Productor:</b>		<b>Cultivo a Establecer:</b>	Papa
<b>Localización muestra:</b>	Tokyo, Galeana, Nuevo Leon	<b>Prof. Muestra:</b>	0-30 cm
<b>Coordenadas:</b>	25.5131648, -100.9516544	<b>Peso Muestra:</b>	1037
<b>Predio / ID:</b>	Goteo / T5	<b>Fecha de recepción:</b>	2024/12/19
<b>Cliente:</b>	Hector Manuel Castillo Soto	<b>Fecha de ejecución:</b>	2024/12/26
<b>Correo Cliente:</b>	castillo36_36@hotmail.com	<b>Fecha de emisión:</b>	2025/01/06

Propiedades Físicas del Suelo			
Clase Textural	Franco Arcilloso		
<sup>1</sup> Punto de Saturación	50.0	%	Mod. Alto
<sup>1</sup> Capacidad de Campo	26.7	%	Mod. Alto
<sup>1</sup> Punto March. Perm.	15.9	%	Mod. Alto
<sup>1</sup> Cond. Hidráulica	1.70	cm/hr	Bajo
<sup>1</sup> Dens. Aparente	0.91	g/cm <sup>3</sup>	

pH del Suelo y Necesidades de Yeso, Cal y Lavado			
<sup>1</sup> pH (1:2 agua)	7.62		Mod. alcalino
<sup>1</sup> pH Buffer	NA		
<sup>1</sup> Carbonatos Totales (%)	26.1	%	Alto
<sup>1</sup> Salinidad (CE Extracto)	4.21	dS/m	Requieren de Lavado
Requerimiento de Yeso	No Requiere		
Requerimiento de Cal	No Requiere		

Fertilidad del Suelo									
Det.	Result.	Unidad	Muy Bajo	Bajo	Mod. Bajo	Med.	Mod. Alto	Alto	Muy Alto
<sup>1</sup> MO	2.61	% (p/p)	[Bar chart showing high fertility]						
<sup>1</sup> P-Olsen	14.9	mg/kg	[Bar chart showing moderate fertility]						
<sup>2</sup> K	281	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]						
<sup>2</sup> Ca	13787	mg/kg	[Bar chart showing very high fertility]						
<sup>2</sup> Mg	99.4	mg/kg	[Bar chart showing moderate fertility]						
<sup>2</sup> Na *	35.4	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]						
<sup>3</sup> Fe	1.09	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]						
<sup>3</sup> Zn	0.85	mg/kg	[Bar chart showing moderate fertility]						
<sup>3</sup> Mn	0.75	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]						
<sup>3</sup> Cu	0.14	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]						
<sup>1</sup> B	1.20	mg/kg	[Bar chart showing moderate fertility]						
<sup>1</sup> S	18635	mg/kg	[Bar chart showing very high fertility]						
<sup>1</sup> N-NO <sub>3</sub>	29.8	mg/kg	[Bar chart showing moderate fertility]						



Relación entre cationes (Basadas en meq/100g)				
Relación	Ca/K	Mg/K	Ca+Mg/K	Ca/Mg
Resultados	95.6	1.14	96.7	83.9
Interpretación	Muy Alto	Bajo	Muy Alto	Muy Alto

\* Es deseable que estos elementos tengan un bajo contenido

PND = Pendiente por verificar NA = No analizado ND = Sin datos



FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.  
Poniente 6 No. 200, Ciudad Industrial, Celaya, Gto. C.P. 38010  
www.fertilab.com.mx

Laboratorio de Análisis de Suelos y Nutrición



FOR-PO-01  
Emisión: 2024-02-09  
Revisión: 05  
ISO 15189  
2013

**INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYO** **FOLIO: SU-244806**

<b>Productor:</b>	Universidad	<b>Tipo de agricultura:</b>	Riego
<b>Correo Productor:</b>		<b>Cultivo a Establecer:</b>	Papa
<b>Localización muestra:</b>	Tokyo, Galeana, Nuevo Leon	<b>Prof. Muestra:</b>	0-30 cm
<b>Coordenadas:</b>	25.5131648, -100.9516544	<b>Peso Muestra:</b>	1013
<b>Predio / ID:</b>	Goteo / T6	<b>Fecha de recepción:</b>	2024/12/19
<b>Cliente:</b>	Hector Manuel Castillo Soto	<b>Fecha de ejecución:</b>	2024/12/26
<b>Correo Cliente:</b>	castillo36_36@hotmail.com	<b>Fecha de emisión:</b>	2025/01/06

Propiedades Físicas del Suelo			
Clase Textural	Franco Arcilloso		
<sup>1</sup> Punto de Saturación	50.0	%	Mod. Alto
<sup>1</sup> Capacidad de Campo	26.7	%	Mod. Alto
<sup>1</sup> Punto March. Perm.	15.9	%	Mod. Alto
<sup>1</sup> Cond. Hidráulica	1.70	cm/hr	Bajo
<sup>1</sup> Dens. Aparente	1.06	g/cm <sup>3</sup>	

pH del Suelo y Necesidades de Yeso, Cal y Lavado			
<sup>1</sup> pH (1:2 agua)	7.66		Mod. alcalino
<sup>1</sup> pH Buffer	NA		
<sup>1</sup> Carbonatos Totales (%)	44.3	%	Alto
<sup>1</sup> Salinidad (CE Extracto)	4.41	dS/m	Requieren de Lavado
Requerimiento de Yeso	No Requiere		
Requerimiento de Cal	No Requiere		

Fertilidad del Suelo										
Det.	Result.	Unidad	Muy Bajo	Bajo	Mod. Bajo	Med.	Mod. Alto	Alto	Muy Alto	
<sup>1</sup> MO	2.81	% (p/p)	[Bar chart showing high fertility]							
<sup>1</sup> P-Clser	14.5	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							
<sup>2</sup> K	257	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]							
<sup>2</sup> Ca	13843	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]							
<sup>2</sup> Mg	97.3	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							
<sup>2</sup> Na *	40.1	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							
<sup>3</sup> Fe	0.99	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							
<sup>3</sup> Zn	0.80	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							
<sup>3</sup> Mn	1.21	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							
<sup>3</sup> Cu	0.14	mg/kg	[Bar chart showing low fertility]							
<sup>1</sup> B	1.29	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]							
<sup>1</sup> S	17113	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]							
<sup>1</sup> N-NO <sub>3</sub>	42.0	mg/kg	[Bar chart showing high fertility]							

Cationes Intercambiables							
Porcentaje de saturación de bases							
Muy Alto	[Bar chart showing high saturation]						
Alto	[Bar chart showing high saturation]						
Mod. Alto	[Bar chart showing high saturation]						
Medio	[Bar chart showing high saturation]						
Mod. Bajo	[Bar chart showing high saturation]						
Bajo	[Bar chart showing high saturation]						
Muy Bajo	[Bar chart showing high saturation]						
% Sat	97.7	1.13	0.93	0.24	NA	NA	
meq/100g	69.1	0.80	0.66	0.17	NA	NA	70.7
Cación	<sup>2</sup> Ca	<sup>2</sup> Mg	<sup>2</sup> K	<sup>2</sup> Na*	<sup>1</sup> Al*	<sup>1</sup> H*	CIC

Relación entre cationes (Basadas en meq/100g)				
Relación	Ca/K	Mg/K	Ca+Mg/K	Ca/Mg
Resultados	105	1.21	106	86.4
Interpretación	Muy Alto	Bajo	Muy Alto	Muy Alto

\* Es deseable que estos elementos tengan un bajo contenido

PND = Pendiente por verificar NA = No analizado ND = Sin datos

## Anexo 4. Análisis del agua



## ANALISIS DE AGUA

Fecha de emisión: 12/03/2024 Folio Informe: 005425

Datos del Cliente				
Cliente:	COMPO EXPERT MEXICO		Zona de Muestreo:	EJIDO EL TOKIO
Solicitado por:	FRANCISCO AVILA	francisco.avila@compo-expert.com	Ubicación:	GALEANA Galeana, Nuevo Leon
Folio Servicio:	24030386		Fecha Recepción:	07/03/2024

Identificación de la muestra				
Folio de Muestra	NT-24030386-1239		Fecha Toma de Muestra	06/03/2024
Tipo de Muestra	AGUA		LOTE	POZO PROFUNDO EJIDO EL TOKIO

Resultados				
Parametros Fisicos	Resultado			Niveles
pH (Potenciometrico)	7.08			6.5 - 8.0
Conductividad Eléctrica mS/cm (Electrométrico)	3.27			0.2 - 2.0 mS/cm
Relación de Absorción de Sodio	0.19			< 5
Porcentaje Sodio Intercambiable (%)	0.04			
Aniones (-)	ppm	Meq/L	Mmol/L	Niveles
Nitratos NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Brusina)	15.94	0.26	0.26	
Fosforo de fosfatos	0.08	0.00	0.00	0.0 ppm
Fosfato Diácido H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (Morgan)	0.25	0.00	0.00	
Sulfatos SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (Turbidimétrico)	1,404.88	29.25	14.63	< 5 Meq/L
Carbonatos CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> (Titulación)	0.00	0.00	0.00	< 0.1 Meq/L
Bicarbonatos HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Titulación)	134.22	2.20	2.20	0.5 - 3.0 Meq/L
Cloruros Cl <sup>-</sup> (Mohr)	35.45	1.00	1.00	< 5.0 Meq/L
SUMA DE ANIONES		32.71		
Cationes (+)	ppm	Meq/L	Mmol/L	Niveles
Sodio Na <sup>+</sup> (Soluble A. Atómica)	17.20	0.75	0.75	< 5.0 Meq/L
Potasio K <sup>+</sup> (Soluble A. Atómica)	1.95	0.05	0.05	0.2 Meq/L
Calcio Ca <sup>+2</sup> (Soluble A. Atómica)	610.00	30.44	15.22	5.0 Meq/L
Magnesio Mg <sup>+2</sup> (Soluble A. Atómica)	24.00	1.97	0.99	4.0 Meq/L
SUMA DE CATIONES		33.21		
Microelementos	ppm	μmol/L		Niveles
Hierro Fe <sup>+3</sup> (L.C.H. Fe -A. Atómica)	0.07	1.25		0.5 ppm
Zinc Zn <sup>+2</sup> (L.C.H. Zn-A. Atómica)	0.05	0.76		1.0 ppm
Cobre Cu <sup>+2</sup> (L.C.H. Cu-A. Atómica)	0.02	0.31		0.2 ppm
Manganeso Mn <sup>+4</sup> (L.C.H. Mn -A. Atómica)	0.02	0.36		0.2 ppm
Boro B <sup>-3</sup> (Azometina-H)	0.08	7.40		1.0 ppm
Observaciones	Verificado conc de Ca y SO4.			

Nota: Los resultados emitidos únicamente avalan la(s) muestra(s) analizada(s) en el presente laboratorio. Se prohíbe reproducir total o parcialmente la información sin previa autorización.

Q.F.B. SAUL SANCHEZ SALOMON  
Responsable de Laboratorio



EMPRESA SOCIALMENTE RESPONSABLE

