

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA  
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Residuos de Carbón Mineral como Estrategia para Optimizar la Eficiencia de Fertilizantes en Papa

Por:

**MARIA JOSE PAULINA CEDILLO CASTILLO**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA**

Saltillo, Coahuila, México

Noviembre, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA  
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Residuos de Carbón Mineral como Estrategia para Optimizar la Eficiencia de  
Fertilizantes en Papa

Por:


**MARIA JOSE PAULINA CEDILLO CASTILLO**

TESIS


Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA**

Aprobada por el Comité de Asesoría

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Alberto Sandoval Rangel  
Asesor Principal

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Héctor Manuel Castillo Soto  
Asesor Principal Externo

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Adalberto Benavides Mendoza  
Coasesor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Alonso Méndez López  
Coasesor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Alberto Sandoval Rangel  
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Noviembre, 2025

## DERECHOS DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

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

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.



Maria Jose Paulina Cedillo Castillo

Autor Principal

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi gratitud está dirigida primeramente a Dios por darme salud y mantener conmigo a mis padres; Enedina Castillo Ovalle y José Joel Cedillo Garcia, quienes han sido mi base sólida y mi refugio en cada etapa de mi vida. Gracias por enseñarme a no rendirme, por apoyarme sin condiciones y por mostrarme con su ejemplo lo que significa la verdadera dedicación. Este trabajo es un reflejo de los valores y la educación que me han brindado.

Quiero agradecer también a dos personas muy especiales para mi Nisi Mariel Cavanzo González y Naivi Quiterio Radilla, quienes me acompañaron durante toda la carrera, quienes fueron el motivo de risas, llantos, estrés y enojos, pero sobre todo se hicieron mi familia durante toda la estancia de nuestra carrera. Sin ellas no hubiera sido lo mismo. De tal forma, quiero darles el crédito a los docentes que nos acompañaron durante nuestra formación académica, dándonos las herramientas necesarias para salir adelante durante esta etapa de nuestra vida y ayudarnos a culminar tan importante ciclo.

Así mismo a quien, con paciencia, compromiso y amor, caminó a mi lado durante esta etapa. Gracias por estar presente en los momentos de mayor exigencia, por tu apoyo constante en lo académico, emocional y personal, y por recordarme aun en los días más difíciles por qué vale la pena seguir adelante. Tu compañía ha sido un sostén silencioso pero firme, y tu fe en mí, una motivación invaluable. Gracias por tanto, Carlos Ivan Santizo Alvarado.

## DEDICATORIAS

Antes que nada, esta tesis va dedicada a Dios, quien es el que me ha dado las ganas, sabiduría, paciencia y fortaleza para poder lograr todo lo que me propongo. Una de estas cosas fue este proyecto, al cual le dedique tiempo y esfuerzo por que las cosas se dieran conforme lo planeado en compañía de las personas que puso en mi camino para que esto fuera posible.

Esta tesis va dedicada con mucho amor a mi papá, quien fue la persona que inicio en mí, el gusto por la agronomía. Esta meta también es suya.

Sin esas pláticas sobre cómo fue su etapa en tan grandiosa universidad y ese gusto y amor que tiene por el ranchito heredado por su papá, no hubiera nacido en mi la curiosidad por saber cómo es la agronomía y no hubiera aumentado mi amor por la naturaleza, ahora aquí estoy, forjando mi carácter en este ámbito.

Agradezco mucho a las personas que me acompañaron en este tan importante ciclo, quienes fueron de la mano conmigo durante este recorrido, doy gracias por sus consejos, sus herramientas para seguir adelante y todas las enseñanzas que dejaron en mí una huella imborrable.

Y como no menos importante a mi alma mater, le agradezco tantas cosas, tantas oportunidades y las personas tan maravillosas que trajo a mí, a las compañeras de carrera que puedo llamar amigas, maestros que se volvieron parte importante para lograr mis objetivos y a la persona que forma parte sentimental en mi vida, quien ha sido mi sostén y me a brindado su apoyo incondicional en las buenas y en las malas, es la persona que me a demostrado su amor de formas agrónomamente posibles, me impulsaste a hacer cosas que no me creía capaz de hacer, me hiciste parte de ti que me enseñaste tantas cosas profesionales y sentimentales. Gracias Antonio Narro, Fuiste mi hogar por cinco años he hiciste a todas estas personas mi familia. Gracias.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	4
<b>DEDICATORIAS</b> .....	5
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	6
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	8
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	8
<b>RESUMEN</b> .....	9
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	10
<b>Objetivo General</b> .....	11
<b>Objetivos Específicos</b> .....	11
<b>Hipótesis</b> .....	11
<b>2.1 El Carbón Mineral</b> .....	12
<b>2.1.1 Situación Actual de la Minería de Carbón en México</b> .....	12
<b>2.1.2 Origen y Formación del Carbón</b> .....	13
<b>2.1.3 Estructura del carbón lignito</b> .....	14
<b>2.1.4 Usos comerciales del carbón lignito</b> .....	14
<b>2.1.5 Antecedentes del uso del carbón lignito en el sector agrícola</b> .....	15
<b>2.2 El Cultivo de la Papa</b> .....	15
<b>2.2.1 Importancia histórica y económica del cultivo de papa</b> .....	15
<b>2.2.2 Aspectos agronómicos del cultivo</b> .....	16
<b>2.2.2.1 Taxonomía</b> .....	16
<b>2.2.2 Morfología de la planta</b> .....	17
<b>2.2.3 Requerimientos edafoclimatológicos</b> .....	19
<b>2.2.4 Fenología de la planta</b> .....	20
<b>2.2.5 Variedades de papa</b> .....	20
<b>2.2.5.1 Fianna</b> .....	20
<b>2.2.6 Nutrición y fertilización</b> .....	20
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	22
<b>3.1 Ubicación del Experimento</b> .....	22
<b>3.2 Material Vegetal</b> .....	22
<b>3.3 Diseño Experimental y Tratamientos a Evaluar</b> .....	22
<b>3.4 Variables evaluadas</b> .....	27

<b>Análisis de Datos .....</b>	<b>28</b>
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>29</b>
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>37</b>
<b>VI. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>38</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Propiedades y usos de los diversos tipos de carbón. ....	13
Figura 2 Análisis del suelo .....	24
Figura 3 Análisis del agua .....	25
Figura 4 Altura de las plantas de papa.....	31
Figura 5 Diámetro del tallo de las plantas de papa .....	32
Figura 6 Cantidad de brotes generados en cultivo de papa.....	33
Figura 7 Rendimiento del cultivo de papa .....	36

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Tratamientos de fertilización con adición de carbón lignito, empleadas en el experimento.....	23
Cuadro 2 Composición de la mezcla física de fertilización comercial al 100% aplicada al cultivo de papa.....	26
Cuadro 3 Propiedades físico-químicas del carbón lignito empleado para el experimento. ....	29
Cuadro 4 Contenido mineral de semillas de papa.....	29
Cuadro 5 Contenido de almidón en semilla de papa.....	30
Cuadro 6 Efecto del carbón lignito adicionado a las mezclas físicas de fertilizantes base sobre el rendimiento de papa .....	34

## RESUMEN

El estudio se desarrolló en Galeana, Nuevo León, México, bajo condiciones de campo abierto con sistema de riego por goteo y un manejo convencional característico de la región. Se evaluaron cinco niveles de una fórmula de fertilizantes de uso comercial (100, 90, 80, 70 y 60%), a los cuales se incorporó de manera uniforme una dosis de 597 kg ha<sup>-1</sup> de carbón lignito. El tratamiento testigo correspondió al 100% de la mezcla comercial sin la adición del carbón lignito. Por lo tanto el objetivo de esta investigación fue evaluar si es factible disminuir el uso de fertilizantes sintéticos mediante la incorporación de carbón lignito a los esquemas de fertilización comercial empleados normalmente. Los resultados obtenidos muestran que, aunque no se observaron diferencias estadísticamente significativas en variables como la altura de planta o el diámetro del tallo, se identificaron tendencias favorables en los tratamientos que incluyeron carbón lignito y una reducción del 30–40 % en fertilización. Dichos tratamientos también reportaron rendimientos más altos, incluso por encima del tratamiento con fertilización al 100 %. Esto indica que el uso de residuos de carbón mineral aumenta la eficiencia de los fertilizantes aplicados al suelo como fertilizantes base, sin comprometer la productividad del cultivo, además mejorar las características del suelo.

**Palabras clave:** Papa, fertilización, carbón lignito.

## I. INTRODUCCIÓN

La productividad agrícola depende principalmente de factores genéticos y ambientales (García-Mora et al., 2023). Sin embargo, para alcanzar rendimientos aceptables es indispensable cubrir los requerimientos nutricionales de los cultivos, lo cual en la agricultura convencional se ha solucionado mediante el uso de fertilizantes inorgánicos que aportan los nutrientes esenciales. En los últimos años, el aumento en el costo de estos insumos y la degradación progresiva de los suelos han limitado la producción agrícola (Zhang et al., 2020; Bárcena-Ibarra, 2022). Frente a ello, la combinación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos ha mostrado mejorar tanto el rendimiento como la calidad nutricional en algunos cultivos, como la papa criolla (Latorre y Quevedo, 2023).

Entre los diferentes tipos de fertilizantes utilizados, los granulados o de base, aplicados en presiembra o directamente al suelo, presentan bajas tasas de eficiencia. Por ello, se ha planteado la necesidad de integrar herramientas tecnológicas y aplicar los fertilizantes de manera más racional para mejorar la estructura del suelo y optimizar su aprovechamiento (Díaz et al., 2023). Una alternativa es el uso de fuentes orgánicas o enmiendas, las cuales aportan compuestos nitrogenados, ácidos orgánicos y otras sustancias que promueven la actividad biológica del suelo (Rodríguez et al., 2022). Dentro de estas, el biocarbón se ha asociado con mayor eficiencia en el uso de nutrientes, mejor retención de agua y estimulación de la microbiota edáfica (Larsen, 2028).

Particularmente, el carbón lignito ha demostrado mejorar la disponibilidad de nutrientes y las propiedades físico-químicas del suelo (Zhao y Naeth, 2022). Entre sus efectos inmediatos se encuentra la reducción de la conductividad térmica en suelos salino-sódicos, resultado del incremento en la microporosidad y aireación del perfil edáfico (Ortiz y Ramírez, 2022). No obstante, la investigación sobre su aplicación agrícola sigue siendo limitada, lo que justifica la exploración de su potencial.

El cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) representa un modelo adecuado para evaluar esta estrategia, ya que es una especie altamente dependiente de la fertilización base. Además de su importancia en la dieta mundial como fuente principal de carbohidratos (Burgos & de Hann, 2019), su origen se remonta a los Andes (Araujo et al., 2021) y actualmente ocupa el quinto lugar en producción agrícola en México, con una superficie de 60,102 ha y una producción de 1.87 millones de toneladas en 2022 (CONPAPA, 2025). A nivel global, la papa alcanzó una producción de 375 millones de toneladas en 2022, destacando China e India como principales productores (FAO, 2024; TRIDGE, 2025).

Considerando su importancia alimentaria y económica, así como su alta dependencia de fertilizantes, la presente investigación se plantea evaluar los efectos del carbón lignito como complemento de los fertilizantes base, con el fin de aumentar su eficiencia y reducir el uso de insumos convencionales en el cultivo de papa.

### **Objetivo General**

Evaluar los residuos de carbón mineral sobre la eficiencia de los fertilizantes base y su efecto en el cultivo de papa.

### **Objetivos Específicos**

1. Evaluar los residuos de carbón mineral sobre la eficiencia de los fertilizantes.
2. Evaluar el efecto de los residuos del carbón mineral sobre el cultivo de papa.

### **Hipótesis**

Los residuos de carbón mineral aumentarán la eficiencia de los fertilizantes y mejorarán el crecimiento y la productividad del cultivo de papa.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 El Carbón Mineral

#### 2.1.1 Situación Actual de la Minería de Carbón en México

A nivel global, China lidera el mercado del carbón, seguida por Indonesia, Estados Unidos, India y Australia. China concentra el 48% de la producción mundial y consume alrededor del 52%. Para 2029, las reservas globales de carbón se estimaron en 1,069 billones de toneladas, concentradas en unos pocos países: Estados Unidos con el 23%, Rusia el 15%, Australia el 14% y China el 13% (SE, 2022).

De acuerdo con cifras del Gobierno de México, en 2024 la industria de extracción de carbón generó un PIB de 1.13 billones de pesos, con un total de 99 unidades económicas registradas. Ese mismo año no se reportó inversión extranjera directa en el sector, y la población ocupada ascendió a 14,700 trabajadores, de los cuales solo 0.56% correspondió a mujeres y 99.44% a hombres, con una edad promedio de 44.3 años (SE, 2025).

Por otra parte, datos de la SE (2022) indican que en 2019 la producción de carbón alcanzó 6.1 millones de toneladas, lo que representó una caída del 9% respecto a los 6.7 millones obtenidos en 2018. Asimismo, la balanza comercial resultó deficitaria mientras que las exportaciones sumaron 9.6 millones de dólares, las importaciones ascendieron a 187.6 millones, generando un déficit de 177.9 millones de dólares. El organigrama que representa la distribución de los diversos tipos de carbón y su aprovechamiento se muestran en la figura 1.

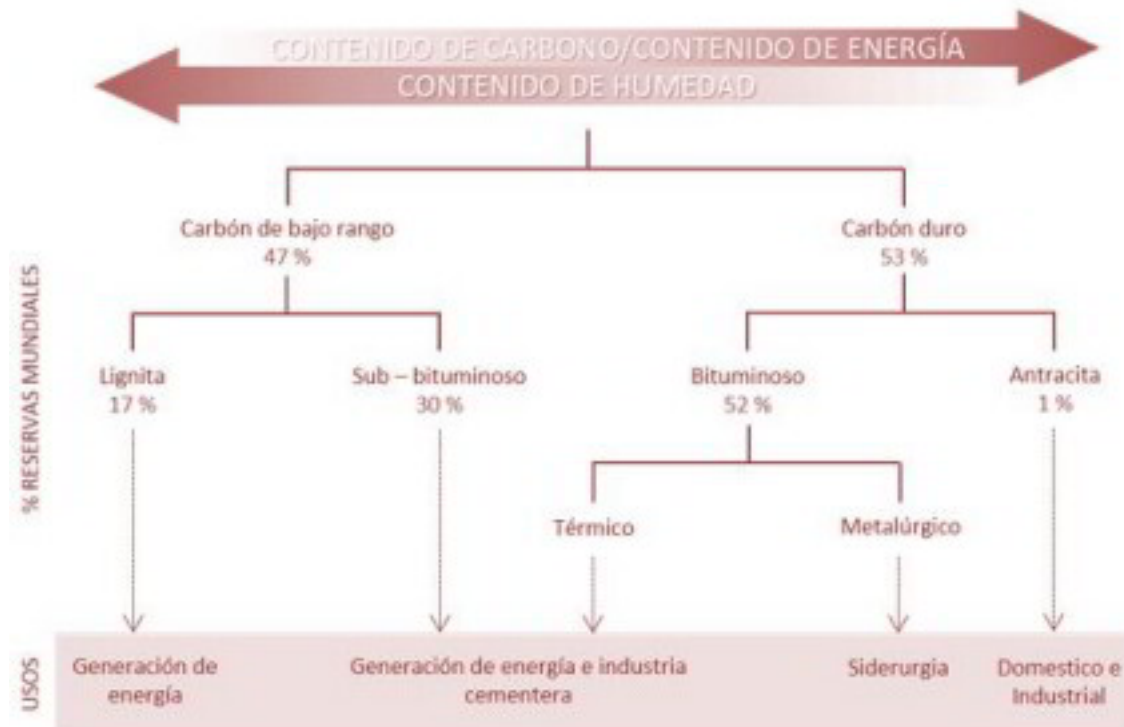


Figura 1 Propiedades y usos de los diversos tipos de carbón(SE, 2022).

### 2.1.2 Origen y Formación del Carbón

El carbón es una roca sedimentaria orgánica formada por procesos de diagénesis bajo condiciones específicas de presión y temperatura. Su composición incluye principalmente C, H, O, S y N, junto con celulosa, lignina, proteínas vegetales y materia orgánica, presentando tonalidades de café a negro y una densidad entre  $1.0$  y  $1.8 \text{ g cm}^{-3}$  (Corona-Esquivel et al., 2006; SE, 2012).

Su origen se relaciona con la acumulación y transformación de turbas en ambientes húmedos y cálidos, donde el sepultamiento y la compactación por sedimentos favorecen su formación, generalmente en lagunas, ríos y estuarios. Existen dos teorías sobre el origen del material vegetal: autóctono, cuando se acumula en el mismo sitio, y alóctono, cuando es transportado por corrientes hasta zonas de depósito, durante su descomposición, los componentes vegetales se degradan en un orden característico (protoplasma, clorofila, aceites, celulosa, cutículas, resinas, etc.), proceso influido por oxígeno, bacterias y condiciones del medio. Así, en suelos

alcalinos puede formarse lignito, mientras que en ambientes salino-sódicos, con menor aireación, se favorece la formación de hulla (Rodríguez, 1951).

Actualmente, los principales constituyentes reconocibles del carbón son los macerales (huminita, liptinita, inertinita) y las cenizas, de naturaleza inorgánica y no combustible. Su clasificación, de menor a mayor contenido de carbono, es: turba (45–60%), lignito (60–75%), hulla (80–90%) y antracita ( $\approx 95\%$ ) (SE, 2012).

### **2.1.3 Estructura del carbón lignito**

De acuerdo con (SIN, 2012), el carbón lignito es un tipo de carbón mineral originado de la turba, formado por compresión. Presenta coloración de negro a pardo, su concentración de carbón varía de 60-75%, con menor contenido de agua que la turba, además, se considera un combustible de calidad media, de fácil combustión, pero de bajo poder calorífico que va de 10-20 MJ kg<sup>-3</sup>. Puede presentar un peso específico de 1.1 a 1.3 g cm<sup>-3</sup>. Se compone básicamente con 69% de C, 5.2% de H, 25% de O y 0.8 de N. Eustaquio (2024) menciona que el carbón lignito posee 65-70% de carbono y 40% de humedad, durante su combustión libera de 17 a 18 MJ kg<sup>-1</sup> sin embargo, debido a su contenido de azufre y sobre todo mercurio, su uso en la agricultura es bajo.

### **2.1.4 Usos comerciales del carbón lignito**

Las cenizas volantes tipo C, derivadas de la calcinación del lignito, se han utilizado en la industria de la construcción para la fabricación de vidrios (Segura, 2022) y en la elaboración de hormigón para obras civiles (Xicoténcatl, 2024). Asimismo, el carbón lignito se ha empleado en la producción de hidrógeno, conocido como hidrógeno café (Rodríguez y León, 2024). En el ámbito energético, se ha reportado su uso en la fabricación de electrodos para generación eléctrica a partir de etanol (Flores, 2023). Además, constituye una fuente primaria para obtener ácidos fúlvicos, compuestos con capacidad de quelar metales pesados y utilizados en la remediación y desinfección de aguas en zonas petroleras (Dueñas y Mora, 2021).

### **2.1.5 Antecedentes del uso del carbón lignito en el sector agrícola**

En el sector agrícola, el carbón lignito se ha empleado principalmente como materia prima para la producción de ácidos húmicos y fúlvicos (Ramírez, 2024). También se utiliza como enmienda de suelos perturbados, favoreciendo el aumento de biomasa microbiana y la reducción del diámetro de agregados en suelos secos (Bekele et al., 2015). Valero (2023) reportó resultados positivos con la aplicación de  $2 \text{ t ha}^{-1}$  de lignito de bajo rango, al reducir la conductividad térmica en suelos de maíz.

De igual forma, Rani et al. (2024) obtuvieron ácidos húmicos a partir de lignito, identificando en su estructura elementos como C, O, F, Al, Na, S, Si, Ca, Ti y Fe. Por su parte, Zhao y Naeth (2022) destacaron el potencial del lignito en la producción de nanohumus, aplicado en suelos arenosos afectados por minería, lo que mejoró el desarrollo de cultivos como alfalfa, cebada y espinoso amarillo, incrementando además la disponibilidad de fósforo en 63%, de potasio en 96% y la biomasa en 749%, 250% y 147%, respectivamente. No obstante, la extracción de lignito no siempre tiene efectos favorables: Pepliński y Czubak (2021) reportaron reducciones en los rendimientos de granos y papa cultivados en zonas de explotación minera.

## **2.2 El Cultivo de la Papa**

### **2.2.1 Importancia histórica y económica del cultivo de papa**

El origen del cultivo de la papa se ubica, según la literatura y estudios antropológicos, en la región de Los Andes, donde fue domesticada hace entre 7,000 y 10,000 años, principalmente en las cercanías del lago Titicaca. En esa zona formó parte esencial de la dieta de las culturas Tiahuanaco, Mochica e Inca (Araujo et al., 2021). Otros autores amplían el rango temporal a entre 13,000 y 6,000 a.C., considerando este lapso como dos etapas de manipulación de la planta que facilitaron su incorporación a la dieta humana. Los vestigios arqueológicos, ceremoniales y antropológicos confirman su presencia desde Los Andes hasta América del Norte en civilizaciones de ese periodo (López, 2023).

La papa llegó a Europa a través de los viajes de exploración y conquista: a España en 1554, Inglaterra en 1586 y Países Bajos en 1610. Sin embargo, en países como Rusia y Escocia se prohibió inicialmente su consumo por motivos religiosos y por la creencia de que, al provenir del suelo, podía provocar lepra (Araujo et al., 2023).

En la actualidad, la papa es un cultivo de gran importancia económica y alimentaria. En 2024, Estados Unidos lideró las exportaciones mundiales con un valor de 320.4 millones de dólares, seguido de Nueva Zelanda con 15.7 millones. En cuanto a importaciones, Estados Unidos también encabezó el mercado con 350.4 millones de dólares, seguido de Noruega (31.8 millones) y Japón (28.8 millones). Respecto al volumen de producción, China ocupó el primer lugar con 96.6 millones de toneladas, seguida por India (56.2 millones) y Ucrania (20.9 millones) (Tridge, 2025).

En México, de acuerdo con datos de SIAP (2025), en 2023 se sembraron 62,440.98 hectáreas. Los estados con mayor superficie sembrada fueron Sonora (16,657.54 ha), Sinaloa (12,271.15 ha) y Veracruz (6,049.94 ha). En términos de producción, Sonora lideró con 612,600.12 toneladas, seguido por Sinaloa (427,587.55 t) y el Estado de México (168,750.23 t). En valor de producción, Sonora también ocupó el primer lugar con \$5,053,499,260, seguido de Sinaloa (\$3,349,460,210) y Nuevo León (\$1,658,566,780).

## **2.2.2 Aspectos agronómicos del cultivo**

### **2.2.2.1 Taxonomía**

Algunos autores han documentado la evolución en la taxonomía de la familia *Solanaceae*, destacando su amplitud, debido a que incluye géneros como *Nicotiana*, *Lycopersicum*, *Capsicum*, *Physalis*, *Ciphomandra*, *Datura*, *Petunia*, *Solanum*, etc., es de vital importancia conocer que tan solo en el género *Solanum*, existen o se agrupan más de 200 especies. Entre estas especies, se encuentran las tuberíferas, las cuales han sido estudiadas desde 1925, cuando solo se conocían 5 series, en la actualidad, se conocen 18 series, entre las que destaca *Tuberosa* (López, 1979).

Actualmente el cultivo de papa se clasifica de forma taxonómica como sigue:

Reino...Plantae  
División...Magnoliophyta  
Clase...Magnoliopsida  
Subclase...Asteridae  
Familia...Solanaceae  
Género...*Solanum*  
Subgénero...*Potatoe*  
Sección...*Petota*  
Serie...*Tuberosa*

(Márquez et al., 2020)

Por su parte CONABIO (2025) proporciona la siguiente clasificación taxonómica para el cultivo:

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Solanales

Familia: *Solanaceae*

Género: *Solanum* L., 1753

Especie: *tuberosum* L., 1753

### 2.2.2 Morfología de la planta

La planta de papa es herbácea, su hábito de crecimiento varía entre las especies y dentro de cada especie, se considera que aquellas plantas cuyas hojas están en la base del tallo o cercanas al suelo, son plantas con habito de crecimiento arrosetado, pudiéndose encontrar además rastreros, decumbentes, erectos y semierectos (Inostroza et al., 2009), sus estructuras se describen a continuación:

**Raíz:** Puede ser un sistema radical débil y superficial o fibroso y profundo, en función del suelo, el cultivo prefiere suelos aireados y poco compactos. El desarrollo de la raíz está también en función del origen de la planta, ya que, si se origina de

semilla, forma un sistema radicular axonomorfo débil, con ramificaciones laterales, mientras que, si se obtiene a partir de tubérculo, la raíz surge en la base de cada brote generado, posteriormente genera raíces en los entrenudos ubicados pegados al suelo (Inostroza et al., 2009).

**Tallo:** Forman un sistema compuesto por tallos, estolones y tubérculos. En plantas provenientes de semilla verdadera (obtenidas de una flor), se observa un solo tallo, mientras que en plantas originadas a partir de una semilla-tubérculo, se generan varios tallos. Los tallos presentan ramificación secundaria, son de angulados a semicirculares, de color verde claro a marrón-rojizo o púrpura. Pueden ser sólidos con el centro relleno o semi huecos, debido a la desintegración de las células en la médula (Inostroza et al., 2009).

**Hojas:** Imparipinnadas, con una longitud de 10 a 25 cm, dispuestas de forma alterna, compuestas con 5 a 9 folíolos los cuales pueden llegar a tener 8 cm de longitud y 4.5 cm de ancho. Los folíolos son enteros, agudos, ovados o cordados, cortamente peciolulados, generalmente presentan folíolos pequeños en los peciólulos, el folíolo terminal más grande; además pueden observarse folíolos intersticiales algunas veces presentes; hojas pseudoestipulares falcadas 1.0 cm largo (CONABIO, 2025).

**Flor:** Se desarrollan formando una inflorescencia (conjunto de flores) de tipo cimosa, presentando de 7 a 15 flores, aunque se han observado variedades con hasta 30 flores. La flor es bisexual, considerada flor perfecta ya que presentan las cuatro estructuras básicas (cáliz, corola, estambres y pistilo) y es la estructura que permite la reproducción sexual del cultivo (semilla verdadera). El color de la flor es típico de cada variedad, en su mayoría son de color blanco (Otiniano, 2017).

**Fruto:** Se desarrolla a partir de una flor fecundada, formando un fruto de tipo baya, con forma esférica, aunque hay variedades en las que puede tomar forma ovoide o cónica. Es de color verde, aunque puede presentar puntos o franjas blancas a naranjas o áreas pigmentadas (Inostroza et al., 2009). Con diámetro de 1-3 cm, es un fruto locular, pudiendo desarrollarse de 40 a 120 frutos por planta, de los cuales un promedio de 20 frutos alcanza la madurez (CONABIO, 2025).

**Semilla:** Planas, ovaladas y de tamaño pequeño, pudiendo haber de 1000 a 1500 semillas por gramo. Presenta testa, embrión y endospermo (Inostroza et al., 2009). Van de 0.13 a 0.18 cm de largo, de color blanco, amarillo o semipardo-amarillo. Es dispersada por el hombre o mamíferos, además, su viabilidad se considera estable hasta por 7 años, presentan latencia innata la cual se rompe después de los 4 a 6 meses de ser extraída de la baya. La latencia puede romperse mediante la alternancia de luz, temperaturas, soluciones químicas y tratamiento físico. Se requiere humedad suficiente y temperaturas de 15 a 20 °C para una mejor germinación (CONABIO, 2025).

**Tubérculo:** Se consideran tallos subterráneos modificados, el tubérculo se forma a partir de la división celular desuniforme del extremo apical del estolón, en la cual el tejido vascular se divide rápidamente, formando una expansión circular, la división celular del estolón se ve incentivada por factores abióticos como radiación, temperatura y fotoperíodo. El tubérculo maduro presenta epidermis, corteza, anillo vascular, tejido perimedular y médula central. La forma y color del tubérculo, así como el número de los mismos por planta lo determina la variedad (López, 1979).

### **2.2.3 Requerimientos edafoclimatológicos**

Los requerimientos ambientales de la papa varían según la etapa fenológica. Durante la brotación y emergencia, la temperatura óptima se sitúa entre 17 y 25 °C, considerándose críticas aquellas por debajo de 5 °C o superiores a 30 °C. En estas fases, la planta requiere una humedad relativa de 60 a 80% y presenta alta sensibilidad al estrés hídrico. En las etapas de emisión de brotes laterales y floración, las necesidades son similares, con ligeras variaciones no significativas. En la fase de maduración, la temperatura óptima desciende a 14–20 °C, siendo críticas las inferiores a 5 °C o superiores a 28 °C; en esta etapa el cultivo muestra una tolerancia moderada al déficit hídrico. El cultivo se desarrolla mejor en suelos franco-arenosos y franco-limosos, profundos y bien drenados, con pendientes menores al 8%, pH entre 5.5 y 6.5, buen contenido de materia orgánica y precipitaciones anuales de 400 a 1200 mm (Mathews, 2018).

#### **2.2.4 Fenología de la planta**

Se distinguen siete etapas fenológicas en el cultivo, las cuales pudieran agruparse en tres fases: vegetativa, reproductiva y maduración. En la fase vegetativa, se identifica la etapa de brotación (V0), emergencia (V1), desarrollo vegetativo (V2), Inicio de floración-tuberización (V3), posteriormente en la fase reproductiva se identifica la etapa de Fin de floración-tuberización (R4), engrose (R5), y finalmente la fase de maduración-fin de cultivo (R6) (Otiniano, 2017).

La duración de cada fase dependerá de la variedad, así como de las condiciones ambientales de temperatura y radiación. En promedio, la brotación ocurre del día 0 a los 13 días, la emergencia de 14 a 21 días de la siembra, mientras que el desarrollo vegetativo va del día 38 al 43 después de la siembra, el inicio de floración tuberización de los 44 a 51 días, fin de floración-tuberización y el desarrollo de tubérculos de los 52 a 79 días, posterior a lo cual, se lleva a cabo el desvarado a los 92 días y la cosecha a los 120 días (Cifuentes, 2020).

#### **2.2.5 Variedades de papa**

##### **2.2.5.1 *Fianna***

La variedad *Fianna* se considera de origen holandés, el tubérculo es ovalado y alargado, los calibres producidos van de grande a muy grande, el peridermis es amarillo y la corteza y parénquima vascular son de color amarillo blanquecino, la variedad es de alto rendimiento y de madurez semi tardía. La cobertura del follaje es de media a alta, la flor es de color blanca y brotes azules, el genotipo presenta buena resistencia a PLRV y a la enfermedad de Sarna Común, responde bien frente a *Phytophthora infestans* y Virus PVY. Además, genera alta materia seca (PotatoPro, 2025).

#### **2.2.6 Nutrición y fertilización**

Cuando se diseña una fórmula de fertilización de acuerdo con los requerimientos de las plantas de papa y la fertilidad del suelo, y esta se aplica según la fenología de la planta, se genera una mayor producción total de tubérculos, es decir, un mayor rendimiento. Al mismo tiempo, la división y reducción de fertilizantes generan un

efecto ambiental positivo, ya que la concentración de  $\text{NO}_3$  en los lixiviados disminuye a medida que se divide la dosis de fertilizante y se reduce su cantidad. Sin embargo, a pesar de que dividir la dosis total de fertilizantes conduce a un mayor rendimiento, no existe correlación con la reducción de la cantidad de fertilizante aplicada (Monsalve et al 2020).

El suministro de una proporción adecuada entre los fertilizantes N y K necesarios para el cultivo de la patata parece ser un paso fundamental para lograr la tasa óptima de crecimiento de las plantas durante la temporada vegetativa, como requisito previo para obtener el máximo rendimiento en un entorno determinado, es decir, en diferentes condiciones de campo y meteorológicas (Grzebisz et al., 2020).

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Ubicación del Experimento**

El trabajo de investigación se estableció en el lote experimental de la unidad de producción “Agrícola y Ganadera MAEVA S.P.R DE R.L”. En El Tokyo, municipio de Galeana, Nuevo León, México. En las coordenadas 24° 34' 9" latitud N y 100° 17' 2" Longitud W., y a 1,899 msnm. El clima es cálido en verano, mismos que se prolonga de abril a agosto, mientras que, en diciembre y enero, el invierno presenta temperaturas muy frías. Las temperaturas anuales oscilan de entre 4 a 26 °C, sin embargo, en raras ocasiones pueden presentarse temperaturas menores a -1 °C o mayores a 31 °C.

#### **3.2 Material Vegetal**

Se utilizó semilla de la variedad comercial Fianna, de segunda generación y tamaño o calibre de cuarta, con un diámetro polar de 28-38 mm. La semilla se obtuvo en Huatabampo, Sonora. A las semillas se les realizó un análisis de contenido mineral y almidón (SANAGRI, 2004).

Previo a la siembra, se enviaron muestras de semillas de papa a un laboratorio especializado para su análisis de composición. Las determinaciones incluyeron el contenido de minerales esenciales (K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Cu y Mn), realizado mediante espectrofotometría de absorción atómica e inducción de plasma acoplado (ICP-OES), conforme a protocolos de la AOAC (2019). El contenido de almidón se evaluó a través del método enzimático con  $\alpha$ -amilasa, expresando los resultados en porcentaje de materia seca.

#### **3.3 Diseño Experimental y Tratamientos a Evaluar**

Se evaluaron cinco porcentajes de fertilizante base 100, 90, 80, 70 y 60% a las cuales se les adicionó la dosis de 597 kg/ha., de carbón lignito y un testigo o control con la dosis al 100% sin carbón (Cuadro 1).

**Cuadro 1 Tratamientos de fertilización con adición de carbón lignito, empleadas en el experimento.**

Tratamiento	Descripción	Gramos por metro lineal del surco	
		Mezcla Física	Carbón lignito
<b>1</b>	Fertilización comercial completa (control)	246.6	0.0
<b>2</b>	100% Fertilización comercial + CL	300.24	53.73
<b>3</b>	90% Fertilización comercial + CL	275.58	53.73
<b>4</b>	80% Fertilización comercial + CL	250.92	53.73
<b>5</b>	70% Fertilización comercial + CL	226.26	53.73
<b>6</b>	60% Fertilización comercial + CL	201.60	53.73

Cada tratamiento se evaluó en 3 repeticiones y cada repetición constó de un surco de 100 m., de longitud y una separación entre surcos de 0.9 m. Sembrados a hilera sencilla, con 5 tubérculos por metro lineal. El arreglo en campo fue de bloque completos al azar.

El Carbón Lignito se obtuvo de la mina de la Cuenca de Burgos, ubicada en el Noreste de la República Mexicana entre los estados de Tamaulipas y Nuevo León y se analizó previo al establecimiento del cultivo.

Las mezclas de fertilizante se calcularon en base al requerimiento del cultivo y los resultados del análisis de suelo y agua (KESWICK, 2004).

Análisis del suelo

Fecha de emisión: 12/03/2024 Folio Informe: 066424

Datos del Cliente				
Cómodo:	COMPO EXPERT MEXICO		Zona de Muestreo:	EJIDO EL TOKIO
Solicitado por:	FRANCISCO AVELA	francisco.avela@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:	GOTE0
SECTOR:	JOSE EMILIO CARDENAS DAVILA	CULTIVO:	PAPA
PROFUNDIDAD (cm):	0-30		

Resultados			
Parámetros Físicos	Resultado		Nivel
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 (%)	01.30		
Materia Orgánica (%)	2.66		
Capacidad de Campo	27.40		
Punto de Marchitez Permanente	16.30		
Textura	Franco-Limosa		
Arenita (%)	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
Nitrogeno Nitrato (N-NO <sub>3</sub> ) (Brioso)	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
Microelementos	ppm	µmol/L	Nivel
Hierro Fe <sup>2+</sup> (DTPA)	2.16	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	0.6 - 3 ppm
Manganeso Mn <sup>2+</sup> (DTPA)	4.10	74.64	5 - 15 ppm
Boro B <sup>2+</sup> (Azometina-H)	0.73	67.53	0.3 - 1.5 ppm
Relación Nutricional	Meq/L		Nivel
NO <sub>3</sub> -K <sup>+</sup>	2.93		1.5 - 2.5 Meq/L
K <sup>+</sup> /Ca <sup>++</sup>	0.06		0.3 - 0.5 Meq/L
Ca <sup>++</sup> /Mg <sup>++</sup>	7.35		2.0 - 2.5 Meq/L
K <sup>+</sup> /Mg <sup>++</sup>	0.41		0.5 - 0.75 Meq/L
Observaciones	Verificado conc. de S-SO <sub>4</sub> .		

Nota: Los resultados emitidos únicamente evalúan 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



Figura 2 Análisis del suelo

# 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				
Parámetros Físicos	Resultado			Niveles
pH (Potenciométrico)	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 Dióxido 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
Cloruro 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>+2</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>+2</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 avale (a) (s) muestras analizadas en el presente laboratorio. Se prohíbe reproducir total o parcialmente la información sin previa autorización.

**Q.F.B. BAJA SANCHEZ SALOMON**  
 Responsable de Laboratorio



EMPRESA SOCIALMENTE RESPONSABLE

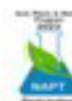


Figura 3 Análisis del agua

Una vez obtenidas las mezclas de fertilizantes, se les adicionó el carbón lignito, para ello se utilizó una mezcladora de diseño y manufactura propios, sin registro de patente (KESWICK, 2004). Las mezclas de la formula comercial al 100% se detalla a continuación (Cuadro 2):

**Cuadro 2 Composición de la mezcla física de fertilización comercial al 100% aplicada al cultivo de papa.**

<b>Tratamiento Testigo (2,740 kg Ha<sup>-1</sup>)</b>			
<b>Kg Ha<sup>-1</sup></b>	<b>Composición</b>	<b>Nombre Comercial</b>	<b>Kg parcela experimental</b>
200	18-46-00	DAP	36.49
500	20.5-00-00	Sulfato de amonio	91.24
500	00-20-00	Super Fosfato de Calcio Simple Std	91.24
500	03-18-00	Super Fosfato de Calcio Simple granulado	91.24
500	00-50-00	Sulfato de potasio	91.24
500	-	Champiñonaza	91.24
40	-	Easy Start	7.29

Para establecer el estudio se prepararon 30 has, para una siembra comercial, que consistió en barbecho, rastra, surcado. De esta superficie se eligió una superficie de 1.015 has de terreno aproximadamente y se seleccionaron 18 surcos de 470 metros lineales y una separación de 0.90 m. lineales.

El ciclo de cultivo comprendió aproximadamente 150 días desde siembra hasta cosecha, por lo tanto, la cosecha se realizó en diciembre del 2024. El riego fue por goteo, con una cinta por surco, marca Toro, calibre 6 mil, con emisores a 0.2 m y un gasto de 1.013 litros por emisor (TORO, 2014).

Las aplicaciones de los tratamientos se realizaron previo a la siembra con una maquina sembradora y fertilizadora, el manejo agronómico del cultivo se realizó de acuerdo a la compañía agrícola donde se realizó el experimento, se aplicó fertilización complementaria con fertilizantes de especialidad solubles vía foliar y riego, (NOVATEC SOLUB 14-48-00+ME (6.25 Kg en 4 Ha.), - BASAFER PLUS EDDHA 6% (1 kg en 4 Ha), POLYFEED 19-19-19+M.E. (12.5 Kg en 4 Ha)).

### **3.4 Variables evaluadas**

En lo referente al cultivo establecido se realizaron evaluaciones durante todas las etapas fenológicas, desde la brotación de la semilla hasta la cosecha de la papa, midiendo las siguientes variables:

**Altura de la planta:** Empleando una cinta métrica graduada en centímetros, se midió desde la base de la planta hasta el ápice del tallo principal, esta medición se realizó cada 30 días, hasta que la planta alcanzó la etapa reproductiva. El resultado se expresó en cm.

**Diámetro de tallos:** Utilizando un vernier digital marca Steren de 15 cm, se midió el diámetro del tallo principal, considerando el diámetro del tallo a una altura de 2 cm por encima del suelo, el resultado se expresó en mm.

**Número de tallos:** Cuando la planta llegó a la etapa vegetativa de forma visual se contabilizó la cantidad de tallos desarrollados por la planta, el resultado se expresó en unidades (n).

**Número de tubérculos por tallo:** Al momento de realizar la cosecha, se contabilizó el número de tubérculos emitidos por tallo, el resultado se expresó en unidades (n).

**Peso de los tubérculos:** Una vez obtenidos los tubérculos producidos por tallo y planta, y con ayuda de una báscula, se agruparon y se pesaron, obteniéndose el peso del conjunto de tubérculos, el resultado se expresó en kilogramos planta<sup>-1</sup>.

### **Análisis de Datos**

Los datos fueron analizados bajo el modelo de bloques al azar con la prueba de medias de LSD Fisher al 95% de confianza. Se utilizó el software estadístico InfoStat 2020.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente apartado se describen los resultados obtenidos a partir de la evaluación de los diferentes tratamientos aplicados al cultivo de papa, los cuales consistieron en distintas proporciones de fertilización química complementadas con la adición de carbón lignito (CL). El análisis comprende las principales variables de respuesta agronómica, con el propósito de determinar el efecto de las combinaciones de fertilización sobre el rendimiento del cultivo. Los resultados se presentan de manera comparativa, destacando las diferencias estadísticas observadas entre tratamientos y la tendencia general del comportamiento del cultivo bajo las distintas condiciones de manejo nutricional.

El residuo de carbón mineral empleado presentó las siguientes propiedades físicas (Cuadro 3).

**Cuadro 3 Propiedades físico-químicas del carbón lignito empleado para el experimento.**

Propiedades del carbón lignito	
Carbón total (sin secar)	67.1%
Humedad a 105 °C	13.1%
Ceniza a 900 °C	16.9%

De acuerdo a los análisis realizados en laboratorio SANAGRILABS, S.A. DE C.V., las semillas presentaron el siguiente contenido mineral (Cuadro 4).

**Cuadro 4 Contenido mineral de semillas de papa.**

	Ca <sup>2+</sup> (ppm)	K <sup>+</sup> (ppm)	Mg <sup>2+</sup> (ppm)	Na <sup>+</sup> (ppm)	Fe <sup>+2</sup> (ppm)	Zn <sup>+</sup> (ppm)	Cu <sup>+2</sup> (ppm)	Mn <sup>+2</sup> (ppm)
Muestra 1	62.57	99.58	55.57	45.25	0.98	0.11	0.31	30.24
Muestra 2	66.38	95.79	52.33	44.36	1.06	0.21	0.14	33.68
Muestra 3	64.60	98.65	54.36	43.67	1.10	0.16	0.16	31.68

Media	64.51	98.00	54.08	44.42	1.04	0.16	0.20	31.86
-------	-------	-------	-------	-------	------	------	------	-------

Adicionalmente se realizó análisis de almidón por el método de  $\alpha$ -Amilasa, obteniéndose los siguientes resultados (Cuadro 5).

#### **Cuadro 5 Contenido de almidón en semilla de papa**

Análisis de contenido de almidón en tubérculo de papa var. Fianna para semilla	
Muestra 1	16.50%
Muestra 2	17.24%
Muestra 3	16.27%
Muestra 4	16.48%
Contenido Promedio	16.62%

#### **Efecto del carbón lignito sobre las variables de crecimiento de la papa**

Al analizar los resultados se encontró una respuesta estadística no significativa, lo que indica que los todos tratamientos empleados son estadísticamente iguales, esto se puede interpretar que no hubo una influencia de los tratamientos sobre esta variable, sin embargo, es satisfactorio que el tratamiento donde se utilizó carbón lignito y los fertilizantes en una cantidad reducida, que varió de 90%, 80%, 70% y 60%, tuvieron una respuesta favorable con respecto al tratamiento donde se utilizó la formula completa y la formula completa más carbón lignito, por lo que es posible reducir la cantidad de fertilizante hasta en un 40%, sin afectar la altura de las plantas.

Al hacer una comparativa de los diferentes tratamientos sobre esta variable se encontró, que a medida en que se reduce el porcentaje de los fertilizantes en la formula se incrementa la altura de las plantas, con una reducción de la formula completa 20, 30 y 40%, mientras que cuando se manejó la formula completa más C.L. así como la formula reducida en un 10% más C.L, esta variable se redujo en un 0.99% y 1.34%, mientras que cuando la formula se redujo en una mayor cantidad, se obtiene un incremento en esta variable de 2.01, 7.5 y 5.77%, es probable que esta respuesta sea debido a una reducción de los niveles de salinidad.

en el suelo, como consecuencia de la reducción de la cantidad de fertilizante en el manejo de la fórmula completa (Figura 4).

La altura de la planta refleja la nutrición que recibe durante su crecimiento. Una planta bien nutrida crece adecuadamente, mientras que una con deficiencias muestra un desarrollo raquítico. Según Liebig (1840), el rendimiento de un cultivo está limitado por el nutriente menos disponible, principio conocido como la Ley del Mínimo. Además, la altura está vinculada a la síntesis de giberelinas, hormonas que promueven el alargamiento celular, siempre que la planta disponga de los precursores químicos necesarios a través de una nutrición equilibrada (Taiz, Zeiger, Møller & Murphy, 2015). Así, la disponibilidad de nutrientes esenciales influye directamente en el crecimiento en altura.

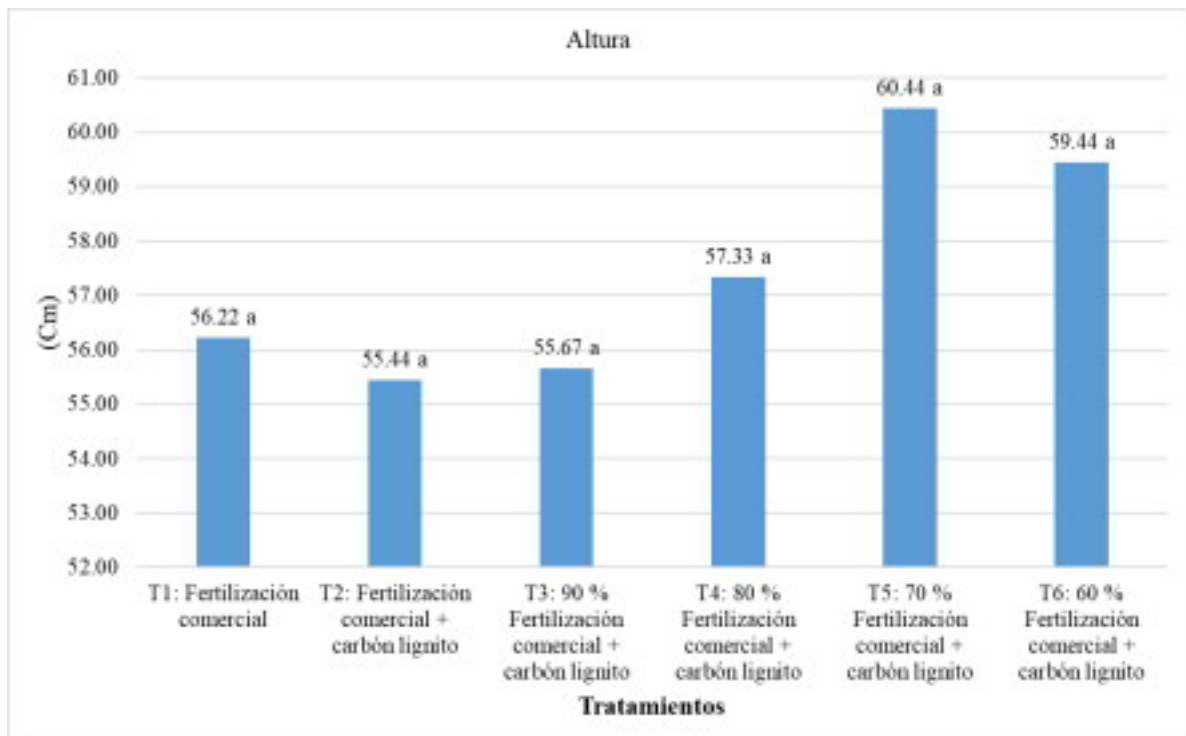


Figura 4 Altura de las plantas de papa. Letras diferentes por barra indican diferencias significativas acuerdo a LSD Fisher ( $p \leq 0.05$ ).

El diámetro del tallo (Figura 5) es el parámetro con más importancia para dar contención a los conductos que canalizan el movimiento del agua y nutrientes a partes distintas de la planta, otorgando robustez y sostén a la misma. El diámetro

del tallo es una característica morfológica influenciada por la disponibilidad de nutrientes en el suelo y la eficiencia en su transporte dentro de la planta. Diversos estudios han demostrado que la incorporación de enmiendas orgánicas, como materiales carbonosos, mejora la estructura del suelo, la retención de nutrientes y la capacidad de intercambio catiónico, lo que puede traducirse en un desarrollo más robusto del tallo y un mayor soporte mecánico para la planta (Lehmann & Joseph, 2015).

En este sentido al hacer uso del carbón lignito en conjunto con la fertilización completa, el T6 registro un mayor diámetro, seguido del T1 (Fertilización comercial) y T2 (Fertilización comercial + carbón lignito). Aunque no hubo diferencias estadísticamente significativas, se observa una tendencia positiva con la aplicación del carbón lignito, particularmente en tratamientos con reducción de fertilización. Esto sugiere que el carbón lignito contribuye a mejorar la disponibilidad de nutrientes y las condiciones del suelo, favoreciendo el engrosamiento del tallo.

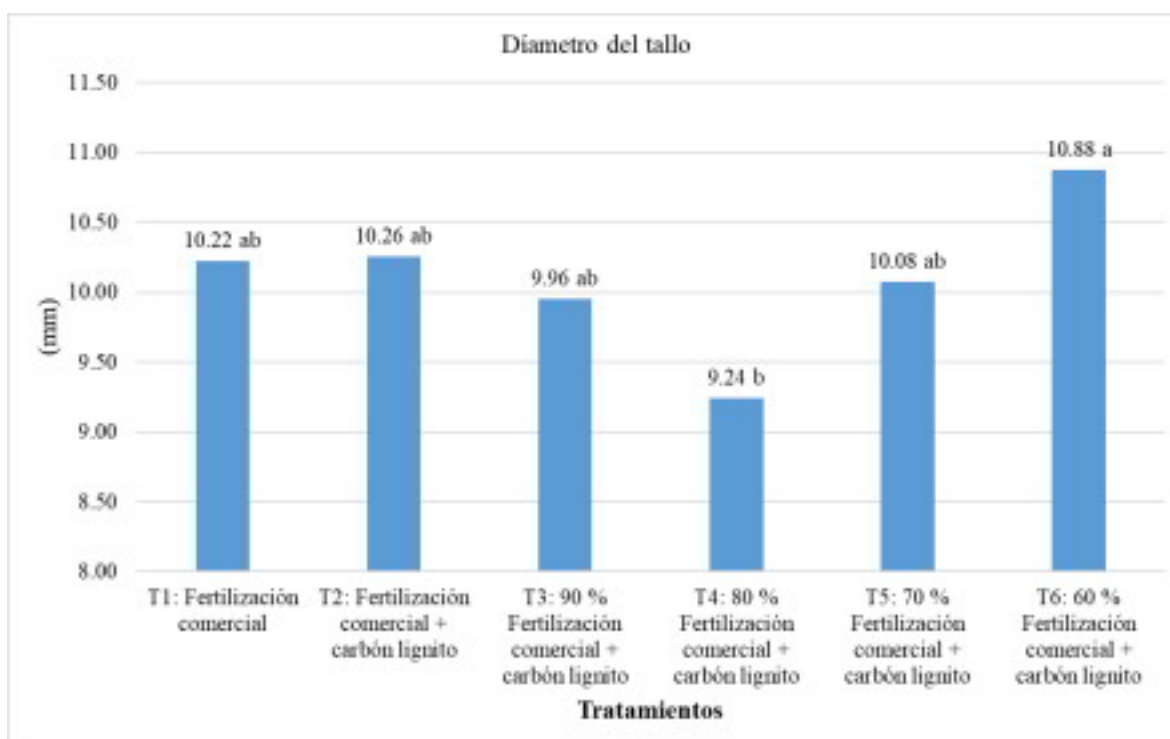


Figura 5 Diámetro del tallo de las plantas de papa. Letras diferentes por barra indican diferencias significativas acuerdo a LSD Fisher ( $p \leq 0.05$ ).

Los resultados (Figura 6) indican que los tratamientos con mayor fertilización o con mayor aporte de nutrientes (T1, T2 y T3) favorecen significativamente la formación de tallos. Por otro lado, los tratamientos con reducción en fertilización y uso de carbón lignito (T4, T5 y T6) presentaron menor número de tallos, sugiriendo que, aunque el carbón lignito puede mejorar ciertas propiedades del suelo, su efecto no fue suficiente para igualar la respuesta obtenida con la fertilización completa o casi completa.

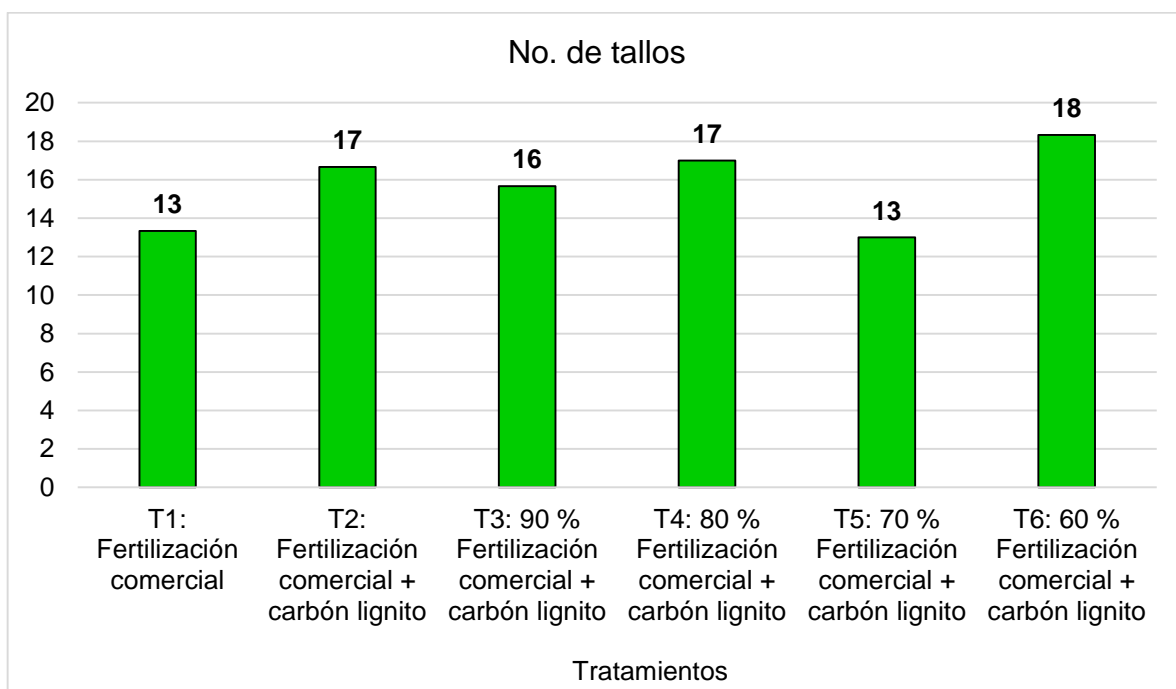


Figura 6 Cantidad de brotes generados en cultivo de papa. Letras diferentes por barra indican diferencias significativas acuerdo a LSD Fisher ( $p \leq 0.05$ ).

En la evaluación del número y peso de tubérculos por metro lineal bajo seis tratamientos con diferentes formas de fertilización y la adición de carbón lignito (CL), se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. El mayor número de tubérculos se obtuvo en el tratamiento T6 con 54.67, seguido por T4 y T5, mientras que los valores más bajos correspondieron a T2 y T1, con 37.33 y 41.67 tubérculos, respectivamente. En cuanto al peso de los tubérculos, el tratamiento T1 presentó el valor más alto (102.58 g), en contraste con el T6, que registró el menor (83.45 g).

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 (Cuadro 6).

**Cuadro 6 Efecto del carbón lignito adicionado a las mezclas físicas de fertilizantes base sobre el rendimiento de papa**

TRATAMIENTOS	Tubérculos por m lineal	
	Numero	Peso g
<b>Fertilización comercial completa (control)</b>	41.67 b	102.58 a
<b>100% Fertilización comercial + Carbón lignito</b>	37.33 b	99.90 ab
<b>90% Fertilización comercial + Carbón lignito</b>	43.67 ab	95.05 abc
<b>80% Fertilización comercial + Carbón lignito</b>	48.00 ab	88.35 abc
<b>70% Fertilización comercial + Carbón lignito</b>	44.67 ab	84.44 bc
<b>60% Fertilización comercial + Carbón lignito</b>	54.67 a	83.45 c
<b>DMS</b>	12.65	15.57

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas acuerdo a LSD Fisher ( $p \leq 0.05$ ).

Los resultados obtenidos sobre el rendimiento (Figura 7) al momento de la cosecha permiten evaluar el efecto de los diferentes tratamientos aplicados. Se analizaron variables cuantitativas relacionadas con la productividad, tales como número de tubérculos cosechados por planta, peso fresco del fruto y rendimiento por Ha. Los datos fueron analizados estadísticamente y se identificaron diferencias significativas entre los tratamientos aplicados. Se observó que todos los tratamientos evaluados,

tanto con fertilización completa como con reducciones del 10 al 40% en combinación con el carbón lignito, mostraron rendimientos estadísticamente similares, sin embargo se identificaron tendencias productivas importantes; El T6 (60 % Fertilización comercial + carbón lignito) fue el más productivo superando el tratamiento comercial estándar, este resultado es relevante, ya que demuestra que la aplicación de carbón lignito permite reducir hasta un 40% el uso de fertilizantes sintéticos sin afectar negativamente el rendimiento, e incluso logrando un incremento.

De manera similar los tratamientos T4 (80 % Fertilización comercial + carbón lignito) y T5 (70 % Fertilización comercial + carbón lignito) obtuvieron respectivamente cifras comparables al tratamiento convencional, lo que respalda lo de la hipótesis de que el carbón lignito puede mejorar la eficiencia del uso de nutrientes al retenerlos en el suelo por más tiempo y liberarlos de manera gradual, beneficiando así su absorción por parte de la planta. Por su parte el T2 (Fertilización comercial + carbón lignito) obtuvo el valor más bajo entre los tratamientos con el carbón lignito, aunque la diferencia con respecto a los demás tratamientos fue más baja y no significativa, esto podría deberse a una ligera competencia entre los nutrientes aplicados y los ya retenidos por el carbón lignito, lo que sugiere que el beneficio del carbón lignito puede ser más evidente cuando hay reducción de fertilización y no necesariamente cuando se combina con dosis completas.

En cuanto el T3 (90 % Fertilización comercial + carbón lignito), el rendimiento se mantuvo dentro de un rango aceptable, pero inferior a T4-T6. Confirmando que las mejores respuestas se dieron cuando la reducción de fertilizantes fue de al menos 20-40%. Probablemente porque en esos escenarios el carbón lignito tuvo un papel más protagónico en la retención y liberación de nutrientes. Estos resultados concuerdan con estudios previos donde la adición de materiales carbonosos al suelo como el carbón lignito o el biochar, ha mostrado beneficios en términos de fertilidad, estructura del suelo, retención de humedad y mayor eficiencia de

fertilización, traduciéndose en incrementos o mantenimiento del rendimiento agrícola con menores insumos (Lehmann & Joseph, 2015; Méndez et al., 2018).

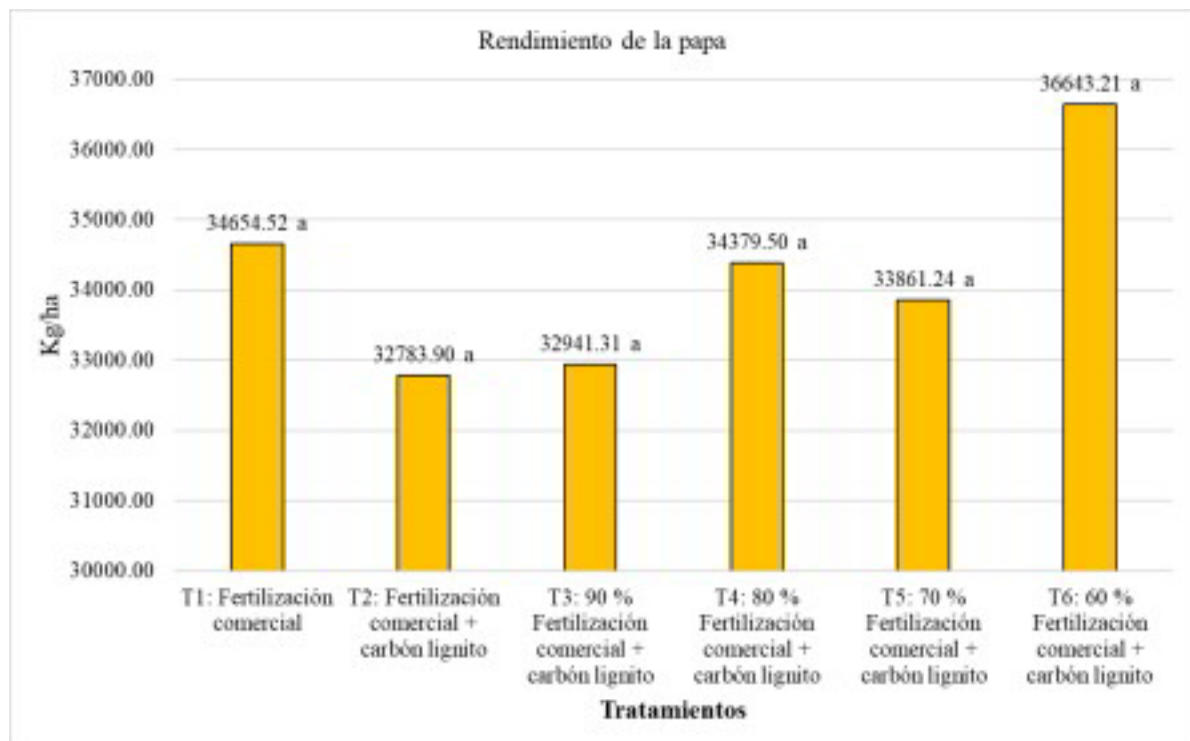


Figura 7 Rendimiento del cultivo de papa Letras diferentes por barra indican diferencias significativas acuerdo a LSD Fisher ( $p \leq 0.05$ ).

## **V. CONCLUSIONES**

La adición de carbón lignito a la dosis de 570 kg/ha, a las mezclas físicas de fertilizante aumentaron su eficiencia hasta un 40%, en el cultivo de papa. En general, las variables evaluadas; altura, número de tallos, peso de tubérculos, así como rendimiento no presentaron diferencias estadísticas significativas entre la mayoría de los tratamientos.

No obstante, el diámetro del tallo mostró una respuesta diferenciada, siendo superior en el tratamiento con 60 % de fertilizante complementado con carbón lignito, en comparación con el T4 de 80 %, aunque estadísticamente similar al testigo con 100 % de fertilización química. Asimismo, el número de tubérculos fue mayor en el tratamiento T6 con 60 % de fertilización más carbón lignito respecto al T1 (testigo), lo que sugiere que una reducción parcial en la fertilización química, acompañada de la incorporación de carbón lignito, puede favorecer ciertos parámetros morfológicos y productivos del cultivo sin afectar de manera significativa el rendimiento general.

Estos resultados indican un posible efecto positivo del carbón lignito en la eficiencia del uso de nutrientes y en el aprovechamiento del fertilizante aplicado. Además, se observó un aumento en la retención de humedad de 6.37%.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- Adhikari, A., Oli, D., Pokhrel, A., Dhungana, B., Paudel, B., Pandit, S., ... & Dhakal, A. (2022). A review on the biology and management of potato tuber moth. *Agriculture*, 68(3), 97-109.
- Araujo Jaramillo, M., Cartagena Ayala, Y., Castillo Carrillo, C., Cuesta Subía, H., Monteros Jácome, J., Paula Caicedo, N., Racines Jaramillo, M., Rivadeneira Ruales, J., Velásquez Carrera, J., León Ruíz, J., Panchi Umaginga, N., Andrade Piedra, J. (2021). Manual del cultivo de papa para pequeños productores. Manual No. 78, 3ra. Edición. INIAP. Mejía-Ecuador. 120p.
- Bárcena-Ibarra, A. (2022). Efectos económicos y financieros en América Latina y el Caribe del conflicto entre la Federación de Rusia y Ucrania. Santiago, Chile: CEPAL.
- Bekele, A., Roy, J. L., y Young, M. A.. 2015. Use of biochar and oxidized lignite for reconstructing functioning agronomic topsoil: Effects on soil properties in a greenhouse study. *Canadian Journal of Soil Science*. 95(3): 269-285. <https://doi.org/10.4141/cjss-2014-008>
- Benavides, O. Á., & Pisco, R. R. Impacto de la adición de carbón de bajo rango en la capacidad de conducción térmica de un suelo sódico. *ciencia del suelo*. En Palma-López D.J., Sánchez-Hernández R. (Compiladores). Uso y manejo del suelo, Vol 3. En: Hacia un conocimiento global y multidisciplinario del recurso suelo. Bautista F y Ayala F. (Eds). Sociedad mexicana de las ciencias del suelo. Texcoco, Estado de México. 311 pp.
- Cifuentes, E. (2020). Manejo del cultivo de papa utilizando grados días: Bases y aplicaciones prácticas para fenología, riego, fertilización, plagas y enfermedades. Serie de Seminarios Virtuales 2020, Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación (COMI), México, 26 pp.
- Confederación Nacional de Productores de Papa de la República Mexicana (CONPAPA, 2025), La producción de papa en México. Disponible en <https://www.conpapa.org.mx/index.php/la-produccion-de-papa-en-mexico>
- Corona-Esquivel, R., Tritlla, J., Benavides-Muñoz, M. E., Piedad-Sánchez, N., & Ferrusquía-Villafranca, I. (2006). Geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón mineral en México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(1), 141-160.
- Díaz-Vázquez, Felicitó Ausencio, Cabrera-De la Fuente, Marcelino, Benavides-Mendoza, Adalberto, Robledo-Torres, Valentín, Juárez-Maldonado, Antonio, García-León, Álvaro, & Sandoval-Rangel, Alberto. (2023). Influencia de cuatro concentraciones de solución Steiner sobre los nutrientes en la solución del suelo y productividad en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Terra*

Latinoamericana, 41, e1646. Epub 12 de junio de 2023. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1646>

Dueñas-Muñoz, J., & Mora-Sanabria, R. (2021). Remoción de metales pesados en aguas congénitas por medio del uso de ácidos fúlvicos. *Mare Ingenii*, 3(1), 12-20.

Eustaquio, F.T. 2024. Leonardita y extractos húmicos como fuentes orgánicas para la agricultura. Tesis. Universidad Nacional Agraria La Molina.

FAO, 2024. Cifras actualizadas del cultivo de papa en el mundo. En FAOSTAT

Flores Carrillo, L. (2023). Desarrollo de electrodos de bajo costo mediante la técnica de electrospinning para una celda de combustible de etanol directo. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/20187>

García-Mora, V. M., Ilbay-Yupa, M., & Veintimilla, R. A. R. (2023). Modelo de predicción para los factores que influyen en el rendimiento del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en Ecuador.

Grzebisz, W., Szczepaniak, W. & Bocianowski, J. (2020). Potassium fertilization as a driver of sustainable management of nitrogen in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Field Crops Research*, 254, 107824. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107824>

Inostroza F., J., Méndez L., P., Sotomayor T., L. (2009). Botánica y morfología de la papa. Temuco: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Vol. no. 193. p. 7-13.

Kaleem Ullah, R. M., Gökçe, A., Bakhsh, A., Salim, M., Wu, H. Y., & Naqqash, M. N. (2022). Insights into the Use of Eco-Friendly Synergists in Resistance Management of *Leptinotarsa decemlineata* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Insects*, 13(9), 846. <https://doi.org/10.3390/insects13090846>

Larsen, Ronal W. 2008. Using biochar for cost-effective CO<sub>2</sub> sequestration in soils. In: Goswami D.Y., Zhao Y. (eds) *Proceeding of ISES World Congress 2007* (Vol. I – Vol. V) Springer, Berlín, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-75997-3\\_499](https://doi.org/10.1007/978-3-540-75997-3_499).

Latorre Araque, C. A., & Quevedo García, E. (2023). Fertilización edáfica en el rendimiento de papa criolla (*Solanum phureja*). *CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROPECUARIA*, 8(1), 3–9. <https://doi.org/10.24054/cyta.v8i1.2830>

López Estupiñán, Laura. (2023). Registros arqueológicos, etnohistóricos y etnobotánicos de la papa en la cordillera de los Andes. *Historia y MEMORIA*, (27), 19-49. Epub December 10, 2023. <https://doi.org/10.19053/20275137.n27.2023.14410>

- López, L. (1979). Morfología y taxonomía de la papa. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/33175>.
- Márquez-Vasallo, Yarisyen, Salomón-Díaz, Jorge Luis, Acosta-Roca, Rosa. (2020). Análisis de la interacción genotipo ambiente en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.). *Cultivos Tropicales*, 41(1).
- Mathews, C. (2018). Requerimientos Agroclimáticos del cultivo de papa. MINAGRI Perú.
- Monsalve, Oscar Iván, Espitia, Eduardo María, y Bolaños-Benavides, Martha Marina. (2020). Fertilización dividida como estrategia para reducir la cantidad de fertilizante aplicado a los cultivos de papa en Colombia. Caso de estudio. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 14(2), 240-248. Epub 11 de noviembre de 2022. <https://doi.org/10.17584/rcch.2020v14i2.10523>
- Ortiz, Orieta, & Ramirez, Ramiro. (2022). Effect of low-rank coal on the thermal conductivity of saline sodic soil. *Información tecnológica*, 33(4), 53-62. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642022000400053>
- Otiniano, R. (2017). Manual del cultivo de la papa para pequeños productores en la sierra norte de Perú. Asociación Pataz, Perú.
- Pepliński, B., & Czubak, W. (2021). The Influence of Opencast Lignite Mining Dehydration on Plant Production—A Methodological Study. *Energies*, 14(7), 1917. <https://doi.org/10.3390/en14071917>
- PotatoPro. (2025). Fianna. <https://www.potatopro.com/potato-varieties/fianna>
- Ramírez Pérez, I. (2024). Extracción de ácidos húmicos de lodos compostados o del digestato de un proceso anaerobio para la obtención de un producto comercial o precomercial. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/208084>
- Rani, J., Kumari, S. & Paul, B. Extraction and chemical characterization of humic acid produced from lignite coals of arid region of Gujarat, Western India. *Sci Rep* 14, 30923 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81861-6>
- Rodríguez Pire, L. (1951). Origen y formación del carbón.
- Rodríguez-Villalón, O., & León-Sánchez, M. M. (2024). Análisis del impulso a la competitividad en el mercado energético de la producción y uso de hidrogeno verde. *Repositorio De La Red Internacional De Investigadores En Competitividad*, 17(17).
- Secretaría de Economía. 2012. Perfil del carbón. Coordinación General de Minería. México.

Secretaría de Economía. 2022. Perfil del mercado de carbón. Coordinación General de Minería. México.

Secretaría de Economía. 2025. Datos de la producción industrial de carbón.

Segura Terrones, Luis Alberto, Sigüenza Abanto, Robert Wilfredo, Solar Jara, Miguel Ángel, & Zamora Mondragón, Jesús Elmer. (2022). Effect of the use of recycled glass on concrete design. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(1), 179-192.

SIAP (2025). Producción agrícola. Cultivo de papa.

SIN (Sistema Integrado de Consulta de Clasificaciones y Nomenclaturas). 2012. Ficha Técnica de Minería, Lignito aglomerado.

Valero Valero, N. O. (2024). Carbón de bajo rango como mejorador del suelo y estimulador del crecimiento temprano de maíz. *Producción Más Limpia*, 19(2).

Xicoténcatl Valle, J. A. (2024). Uso sustentable de las cenizas volantes para la fabricación de hormigón y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Tesis. Universidad del Estado de Morelos.

Zhang, C., Li, X., Yan, H., Ullah, I., Zuo, Z., Li, L., & Yu, J. (2020). Effects of irrigation quantity and biochar on soil physical properties, growth characteristics, yield and quality of greenhouse tomato. *Agricultural Water Management*, 241(10), 106263. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106263>

Zhao, Y., & Naeth, M. A. (2022). Application timing optimization of lignite-derived humic substances for three agricultural plant species and soil fertility. *Journal of Environmental Quality*, 51, 1035–1043. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20393>