

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA



Comparación de MAP y el Ácido Fosfórico como Fuente de Fósforo en el Cultivo
de Brasicas

Por:

CÉSAR ORTIZ MENDOZA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México

Mayo 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Comparación del MAP y el Ácido Fósfórico como Fuente de Fósforo en el Cultivo de
Brasicas

Por:

CESAR ORTIZ MENDOZA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Aprobada por el Comité Asesor:


DR ALBERTO SANDOVAL RANGEL
Asesor Principal


MC WENDY XIOMARA SANDOVAL ORTIZ
Asesor Principal Externo


DRA LAURA RAQUEL LUNA GARCIA
Coasesor


ING GERARDO RODRIGUEZ GALINDO
Coasesor


DR ALBERTO SANDOVAL RANGEL
Coordinador de la División de Agronomía

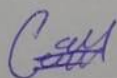


Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Mayo 2026

Manifiesto de Honestidad Académica

El suscrito, César Ortiz Mendoza estudiante del nivel licenciatura de la Ingeniería en Horticultura, autor de la presente Tesis, manifiesta que:

1. Reconoce que el plagio académico constituye un delito que está penado en nuestro país.
2. Las ideas, opiniones, datos e información publicadas por otros autores y utilizadas en la presente Tesis, han sido debidamente citadas, reconocimiento la autoría de la fuente original.
3. Toda la información consultada ha sido analizada e interpretada por el suscrito y redactada según su criterio y apreciación, de tal manera que no se ha incurrido en el "copiado y pegado" de dicha información.
4. Reconozco la responsabilidad sobre los derechos de autor, materiales bibliográficos consultados por cualquier vía, y manifiesto no haber hecho mal uso de alguno de ellos.
5. Entiendo que la función y alcance del comité de asesoría, está circunscrito a la orientación y guía, respecto a la metodología de la investigación realizada para la presente Tesis; Así como el análisis e interpretación de los resultados obtenidos por lo tanto eximo de toda responsabilidad relacionada al plagio académico a mi Comité de Asesoría, aceptando cualquier responsabilidad al respecto es únicamente a mi persona



César Ortiz Mendoza

**Tesista de licenciatura
UAAAN**

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios por permitirme llegar hasta aquí, al darme salud, un sueño por el cual luchar y la fe necesaria para alcanzarlo. Gracias por guiar mis pasos, bendecirme y rodearme de personas que creyeron en mí y que han sido clave en mis logros, por las segundas oportunidades, por las puertas que abriste y por aquellas que cerraste, porque todo formó parte en este proyecto de vida. También quiero agradecerme a mí mismo por no rendirme ante las dificultades, por resistir las noches de desvelo, el estrés y los días de lágrimas. A pesar de todo logre superarlo y hoy aquí los frutos de todo el esfuerzo, constancia y sacrificio.

A mi Alma Terra Mater

A mi gloriosa Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, gracias por abrirme las puertas y brindarme un espacio donde crecí no solo como estudiante, sino también como persona, gracias por regalarme una de las mejores etapas de mi vida, en donde aprendí lecciones más allá de los libros: disciplina, constancia, compromiso y amor a lo que hago. Gracias por darme una segunda familia y poner en mi camino a personas valiosas que siempre me brindaron su apoyo incondicional. Con orgullo y profunda gratitud, seré por siempre parte de esta gran institución. ¡Buitre hoy y siempre!

Al Dr. Alberto Sandoval Rangel

Por acompañarme y apoyarme a lo largo de este proyecto, gracias por confiar en mis capacidades y brindarme su ayuda, gracias por enseñarme el valor de la constancia, la responsabilidad y el amor por lo que se hace, por aclarar mis dudas cuando no comprendía y orientarme en cada paso, agradezco sus consejos por enseñarme a trabajar con lo que se tiene a la mano y por motivarme a superarme y a seguir aprendiendo. Le agradezco por brindarme su amistad y por no dejarme solo en ningún momento.

Al Dr. Leobardo Bañuelos Herrera

Gracias por ser mi consejero durante toda mi etapa académica, por orientarme, acompañarme y ayudarme a tomar mejores decisiones. Agradezco su apoyo constante, su disposición para aclarar mis dudas y sus enseñanzas, que me ayudaron a mantenerme enfocado y a comprender mejor los retos de la vida.

A la Dra. Laura Raquel Luna García

Gracias por creer en mí, por su ayuda constante y por dedicarme parte de su tiempo con tanta paciencia y comprensión, gracias por compartir su conocimiento, hizo que el camino fuera más sencillo. Estaré siempre profundamente agradecido.

A mis profesores

Dra. Nadia, Dra. Rosalinda, Dra. Fabiola, Ing. Gerardo, Dr. Víctor, Dr. José Antonio, Dr. Marcelino, Dr. Etelberto, Dr. Raúl, Dr. Isaac, Eva, Martí, gracias por sus enseñanzas, su apoyo incondicional, sus consejos a lo largo de mi vida académica, por compartir sus conocimientos, por resolver mis dudas y por regalarme su tiempo, gracias por brindarme educación, uno de los mayores regalos que puede recibir, pues es la herramienta más poderosa para transformar el mundo. Gracias por darme las bases necesarias para enfrentarme a la vida.

A mis amigos

Julio C, Eduardo, Andrés, Alexander, Ariadna, Ange V, Citlalli, Nayeli V, Liliana, Allen, Edith, Sofía, Salvador, Gerardo, Miguel, Guasave, Picoro, Leonardo C, Adrián, Leonardo G, Benny, Irving, Adolfo, Joshi, Ana M, Fátima, Alejandra, Leslie, Itzel, Laura, Allison, Marco, Oscar, Daniel, Michelle, Josh, gracias por su amistad y por creer en mí, por cada gesto de ánimo, su compañía incondicional y la paciencia que siempre me brindaron, por enseñarme tantas cosas dentro y fuera del salón, por cuidarme y no dejarme solo, por el apoyo constante que me dieron para llegar donde estoy, más que mis amigos se convirtieron en mi segunda familia. Estoy profundamente agradecido por haber coincidido con ustedes y por ser parte de este viaje.

DEDICATORIAS

Para mis padres

Mendoza Aguilar Clotilde y Ortiz Aguilar Artemio, este proyecto es para ustedes, las palabras no pueden expresar completamente la gratitud y amor que siento por ustedes, les estoy eternamente agradecido por ser mi guía, mis protectores, mis maestros, inculcándome los sus valores el respeto hacia otros, a enseñarme a luchar por mis sueños, el creer en mí mismo y esforzarme todos los días para mejorar y ser una mejor versión como persona. Mamá, Papá, estoy agradecido porque sé que me dieron lo mejor que pudieron darme, por creer en mi incluso cuando yo dudaba, a ser siempre humildes, valorar lo que tienes, ser agradecidos con la vida y con dios, que a veces puedes ir hacia atrás para tomar impulso para seguir avanzando y no rendirse, aprecio de todo corazón el apoyo emocional, las preocupaciones, los ánimos constantes que me brindaron, ya que para mí son el motor que me impulso a seguir mis sueños. Me es un orgullo dedicarles este logro, sus corazones fueron los que me impulsaron a conseguirlo, ahora sé que no es fácil tomar decisiones y que ahora todas esas decisiones construyeron la persona que soy ahora, construyeron mi carácter moldearon mi personalidad. Gracias por ser estar siempre a mi lado en cada éxito y fracaso de este proceso.

A mi hermana

Ortiz Mendoza Araceli, gracias por ser mi primera amiga, mi ejemplo, guía, mi refugio, consejera, crecí mirándote queriendo ser como tú, me enseñaste a ser fuerte a no temerle a la vida, dándome porras y regaños en los momentos difíciles por estar siempre ahí, por tenerme, confianza apoyo incondicional, por ser mi pilar, las cuales me han dado fuerzas para cumplir esos sueños que un día te jure. Este logro es gracias a ti por abrirme camino, en creer en mí, tenerte cerca hizo que el camino fuera menos pesado, juntos superamos obstáculos este es también el sacrificio de tu tiempo conmigo.

A mis primos

Adolfo, Liliana, Verónica, Luis, Celia, Lizbeth, Mereció, Johana, Hugo, Beatriz, Marcela, Rubén, Hilda, Edith, Pilar, Maldonado Luis. Su presencia en mi vida es un regalo, gracias por enseñarme que las crisis son transformaciones y que la prisa no asegura el éxito, me dieron la fuerza para levantarme cuando el mundo me golpeó, y gracias a eso, años después sigo de pie luchando cada día, esa perseverancia es lo que me define. Gracias por ser mi brújula, mis consejeros, mis maestros y mis mejores amigos, este logro es tanto mío como de ustedes, sin su guía el camino no habría sido lo mismo.

A mis tíos

Vicenta, Carolina, María, Máximo, Casimiro, Sebastián, gracias por su apoyo incondicional, su generosidad, cariño, regaños y los miles de consejos han sido fundamentales en mi camino, gracias por darme ese empujón cuando faltaban las fuerzas y por creer en mí, todo ello me sirvió para llegar donde estoy y tener claro hacia dónde voy. Este logro también es de ustedes.

INDICE

AGRADECIMIENTOS.....	1
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
REVISIÓN DE LITERATURA	12
Fertilizantes.....	12
Fertilizantes químicos	15
Fertilizantes fosfatados.....	16
Fosfitos.....	18
Fertilización con MAP	19
Fertilización con Ácido Fosfórico	20
Brócoli	22
Coliflor	24
Repollo	26
Localización del sitio experimental	28
Descripción de Tratamientos	28
Descripción de Actividades.....	29
Producción de plántula y trasplante	29
Preparación del terreno.....	29
Trasplante.....	29
.....	31
RESULTADOS	32
Brócoli.....	32
Coliflor	33
Repollo	34
Discusión.....	36
REFERENCIAS	40

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos evaluados.....	28
Cuadro 2. Evaluación de MAP Y H_3PO_4 en el cultivo de brócoli.	32
Cuadro 3. Evaluación de MAP Y H_3PO_4 en el cultivo de coliflor.	34
Cuadro 4. Evaluación de MAP Y H_3PO_4 en el cultivo de repollo.	34

INDICE DE FIGURAS

Imágenes 0.1.....	29
Imágenes 0.2.....	29
Imágenes 0.3.....	29
Imágenes 0.4.....	31
Imágenes 0.5.....	31
Imágenes 0.1.....	31
Imágenes 0.2.....	31

RESUMEN

La fertilización fosfatada es una práctica esencial para garantizar el suministro adecuado de fósforo en los cultivos, debido a su participación en procesos como la transferencia de energía, el desarrollo radicular, la fotosíntesis y la formación de órganos comerciales. Entre las fuentes solubles de fósforo destacan el fosfato monoamónico (MAP) y el ácido fosfórico (H_3PO_4), los cuales presentan diferencias en composición, solubilidad y disponibilidad nutricional. El MAP aporta fósforo y nitrógeno amoniacal, mientras que el ácido fosfórico proporciona una fuente altamente soluble de fósforo y puede contribuir a disminuir el pH de la solución del suelo. Sin embargo, existe incertidumbre sobre cuál fuente genera una mejor respuesta agronómica en cultivos hortícolas, particularmente en brásicas.

El objetivo del estudio fue comparar el efecto del MAP y del ácido fosfórico como fuentes de fósforo en el crecimiento, productividad y calidad de brócoli, coliflor y repollo. La investigación se realizó en campo abierto en el Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, bajo un diseño factorial en bloques completos al azar, evaluando seis tratamientos resultantes de la combinación de dos fuentes fosfatadas y tres cultivos. Se midieron variables vegetativas, desarrollo radicular, peso y diámetro de inflorescencia o cabeza comercial.

Los resultados mostraron que la respuesta dependió del cultivo y de la variable evaluada. En brócoli, el MAP favoreció mayor desarrollo foliar, diámetro y peso de inflorescencia, lo que sugiere un mejor aprovechamiento del fósforo y nitrógeno aportados por esta fuente. En coliflor, ambos fertilizantes mostraron efectos variables, aunque el ácido fosfórico presentó ligera ventaja en el peso de pella. En repollo, el H_3PO_4 promovió mejores respuestas en desarrollo radicular, crecimiento vegetativo y formación de cabeza. Se concluye que no existe una fuente fosfatada universalmente superior, por lo que su elección debe basarse en el cultivo, la etapa fenológica y el objetivo productivo.

ABSTRACT

Phosphate fertilization is essential to ensure an adequate phosphorus supply in crops, as this nutrient participates in key processes such as energy transfer, root development, photosynthesis, and the formation of commercial plant organs. Among the most commonly used soluble phosphorus sources are monoammonium phosphate (MAP) and phosphoric acid (H_3PO_4), which differ in composition, solubility, and nutrient availability. MAP provides phosphorus and ammoniacal nitrogen, whereas phosphoric acid supplies a highly soluble phosphorus source and may contribute to lowering the pH of the soil solution. However, uncertainty remains regarding which source produces a better agronomic response in horticultural crops, particularly in brassicas. The objective of this study was to compare the effect of MAP and phosphoric acid as phosphorus sources on the growth, productivity, and quality of broccoli, cauliflower, and cabbage. The experiment was conducted under open-field conditions at the Department of Horticulture of the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, using a factorial arrangement in a randomized complete block design. Six treatments were evaluated, resulting from the combination of two phosphate sources and three crops. Vegetative growth variables, root development, and the weight and diameter of the commercial inflorescence or head were measured. The results showed that crop response depended on the species and the variable evaluated. In broccoli, MAP promoted greater foliar development, inflorescence diameter, and inflorescence weight, suggesting better utilization of the phosphorus and nitrogen supplied by this source. In cauliflower, both fertilizers showed variable effects, although phosphoric acid had a slight advantage in curd weight. In cabbage, H_3PO_4 promoted better responses in root development, vegetative growth, and head formation. It is concluded that there is no universally superior phosphate source; therefore, the selection of MAP or phosphoric acid should be based on the crop, phenological stage, and production objective.

Keywords: Phosphorus; monoammonium phosphate; phosphoric acid; *Brassicaceae*; phosphate fertilization; horticultural yield.

INTRODUCCIÓN

La fertilización es una práctica fundamental para el suministro de nutrientes en los cultivos, el éxito depende en gran medida de la selección adecuada del tipo de fertilizante (Zhang et al., 2024). De manera general los fertilizantes pueden clasificarse en dos categorías: fertilizantes base o de liberación lenta y los fertilizantes solubles (Chien et al., 2016).

En el caso particular del fósforo (P), para la fertilización de base, aplicada directamente al suelo, los fertilizantes más comunes son; fosfatos de calcio en sus formas simple y triple, fosfato monoamónico granular (MAP) y fertilizantes orgánicos como harina de huesos, guano (Li et al., 2024). Por otro lado, cuando se requiere una rápida disponibilidad y absorción del P, se utilizan fuentes altamente solubles, entre las que destacan el MAP soluble y el ácido fosfórico. (Mohamed, et al., 2021).

El ácido fosfórico (H_3PO_4) constituye el insumo químico fundamental en los procesos industriales destinados a la elaboración de fertilizantes fosfatados empleados en la agricultura (Wu, F., 2025). Se produce agregando ácido sulfúrico a la roca fosfórica pulverizada (Apatita), generando ácido fosfórico y yeso (Guirola et al., 2023). Diversas investigaciones enfocadas en las tecnologías de producción, han señalado que este compuesto actúa como base para la síntesis de distintas fuentes de fósforo, entre ellas los superfosfatos y los fosfatos de amonio (Guelfi, et al., 2022). Debido a esta función estratégica, el ácido fosfórico desempeña un papel esencial en el suministro de fósforo, un nutriente indispensable para el adecuado crecimiento y desarrollo de los cultivos agrícolas (Wu et al., 2022). El fósforo procedente de compuestos como el ácido fosfórico, al incorporarse al suelo o a la solución nutritiva, se transforma en ortofosfatos principalmente como dihidrógeno fosfato (H_2PO_4^-) y, en menor proporción, como hidrógeno fosfato (HPO_4^{2-}) estas formas pueden ser aprovechadas por las plantas (Fang et al., 2024). Estas especies se presentan cuya predominancia depende del pH del suelo. La absorción ocurre a través de transportadores en las raíces y por difusión en la solución del suelo; sin embargo, su disponibilidad suele ser limitada debido a su baja movilidad y a la

formación de compuestos poco solubles con elementos como calcio, hierro o aluminio. (Chen et al., 2023). Otro elemento derivado de la disociación de ácido fosfórico en el agua o solución del suelo es el Hidrogeno (H^+), que al contribuye a la eliminación de bicarbonatos (HCO_3) y disminución del pH. (Brownrigg et al, 2022).

El fosfato monoamónico ($NH_4H_2PO_4$), se produce mediante la neutralización del ácido fosfórico (H_3PO_4) con amoníaco (NH_3). (Xu et al., 2022). Su elaboración industrial se lleva a cabo generalmente en sistemas de reacción controlada, como reactores tubulares o equipos de granulación, dando como resultado un fertilizante sólido caracterizado por un elevado contenido de fósforo, expresado como P_2O_5 , así y la presencia de nitrógeno amoniacal. (Mc Lachlan et al., 2024). Debido a su alta solubilidad en condiciones de humedad, el MAP facilita una liberación rápida de estos nutrientes, lo que favorece su disponibilidad y aprovechamiento por parte de los cultivos (IPNI, 2025). Al disolverse el MAP en el agua, si libera amonio (NH_4) y el fósforo permanece principalmente como ion dihidrógeno fosfato ($H_2PO_4^-$), forma que puede ser absorbida por las raíces mediante transportadores presentes en las membranas celulares (Di Tomassi et al., 2021). La eficiencia de este proceso depende de la actividad radicular y de las condiciones del suelo que regulan la movilidad del fósforo. (Lambers, 2022).

Dada la composición de MAP y el ácido fosfórico, existe la duda de cuál fuente aplicar, además de los mitos de que el ácido fosfórico es nocivo para el suelo, por esta razón este estudio tiene como propósito validar cual fuente tiene mejor respuesta en los cultivos.

Se eligieron los cultivos de Brócoli, Col o Repollo y Coliflor, por su importancia alimenticia, económica y social. (Pino,2016). En México en el año 2024, se produjeron 640 mil toneladas de brócoli, en una superficie aproximada de 35 mil hectáreas, con un rendimiento promedio de 18.4 ton/ha y un valor de 4,601 millones de pesos. (Cisneros y Rocha, 2019) Del cultivo de coliflor, la producción fue de 95,941 toneladas, en una superficie de 4,086 hectáreas, con un rendimiento promedio nacional 23.5 toneladas por hectárea. El precio promedio a nivel nacional

fue de 6,249 pesos por tonelada, con un valor acumulado de 599.6 millones de pesos. Respecto al cultivo de Repollo o col la producción fue de 194,748 toneladas, con un rendimiento promedio de 33.7 toneladas por hectárea. Los estados que lideraron la producción de estos cultivos fueron Guanajuato y Puebla. Cisneros-Reyes y Rocha Ibarra (2019) Con base en lo anterior el **objetivo** del estudio es comparar el ácido fosfórico y MAP, como fuentes de fosforo en la fertilización de *Brassicas*.

Hipótesis

El MAP y el Ácido fosfórico tendría una respuesta diferente sobre el crecimiento, productividad y calidad de las *Brassicas*

REVISIÓN DE LITERATURA

Fertilizantes

El estudio realizado por Frattini (2023) examinó el impacto del uso continuo de fertilizantes sintéticos y de prácticas agrícolas convencionales, como la incorporación de residuos de cosecha al suelo, sobre la salud de los ecosistemas edáficos, considerando aspectos que no se limitan a los indicadores físico-químicos tradicionales (Dzul-caamal, 2020). Para evaluar estos efectos, se emplearon bioindicadores, particularmente la lombriz de tierra *Eisenia foetida*, como herramienta para analizar la calidad biológica del suelo. Los resultados evidenciaron que la exposición a suelos tratados con fertilizantes nitrogenados, fosfatados o urea generó respuestas negativas en las lombrices, se observaron alteraciones morfológicas y daño celular, lo que indica que los efectos de estas prácticas agrícolas trascienden las evaluaciones químicas convencionales y afectan funciones biológicas esenciales del suelo.

Por otro lado, el análisis realizado por Ishfaq et al. (2023), basado en más de 550 ensayos de campo desarrollados entre 1972 y 2022, demuestra que la fertilización tiene un efecto positivo significativo sobre la productividad y la calidad de los cultivos alimentarios. En promedio, la aplicación de nutrientes incrementa el rendimiento agrícola en alrededor del 30 % y mejora la calidad nutricional en aproximadamente un 12 %, especialmente en hortalizas (Gram et al., 2020) Estos beneficios se potencian cuando se combinan fertilizantes minerales con enmiendas orgánicas y se aplican bajo condiciones adecuadas de suelo y clima. Asimismo, los mayores avances en calidad nutricional se observaron en África, lo que pone de relieve la importancia de una gestión responsable y sostenible de la fertilización para garantizar una producción de alimentos más nutritiva a escala global.

A pesar de que los fertilizantes minerales han sido fundamentales para aumentar la productividad agrícola, su uso desigual ha generado problemas tanto de exceso como de deficiencia de nutrientes en distintos sistemas productivos (McClellan Maaz et al., 2025). Frente a este escenario, se realizó la estrategia de 4R (Right

source, Right rate, Right time y Right place) para mejorar la eficiencia de la fertilización mediante una aplicación más ajustada a las condiciones locales y a las necesidades de los cultivos (Bruulsema et al., 2012). Asimismo, se reconoce el potencial de nuevas tecnologías, como los nanofertilizantes, los biofertilizantes y los fertilizantes de liberación controlada, para optimizar la disponibilidad de nutrientes y reducir impactos ambientales (Maaz et al., 2025).

Los fertilizantes de eficiencia mejorada están diseñados para liberar los nutrientes de forma gradual, con el fin de ajustarse a las necesidades del cultivo y reducir pérdidas por lixiviación y volatilización (Asadu et al., 2024). A diferencia de los fertilizantes convencionales, cuyo uso intensivo puede causar acidificación del suelo, emisiones de gases de efecto invernadero y contaminación del agua (Gonzales-Estrada et al., 2017). Mientras que los EEFs (Fertilizantes de Eficiencia Mejorada) contribuyen a disminuir estos impactos ambientales y, en algunos casos, mejoran la estructura del suelo y reducen la erosión del suelo. (Chen, 2023).

Kumar, et al. (2021) examinan los mecanismos mediante los cuales las plantas regulan de forma integrada la absorción, el transporte interno y las respuestas fisiológicas asociadas a nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, así como a micronutrientes clave como hierro y zinc. Un suministro equilibrado de estos elementos es determinante para el crecimiento, el desarrollo fisiológico y la productividad de los cultivos (Fan et al., 2021) Aunque la nutrición vegetal se ha estudiado tradicionalmente de manera aislada por nutriente, en realidad opera una red compleja de interacciones entre macro y micronutrientes que modula procesos fisiológicos y bioquímicos fundamentales. Esto permite mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes y elevar la calidad de los cultivos en condiciones agrícolas reales.

Por su parte, Merga Boru (2025) señala que los fertilizantes orgánicos desempeñan un papel clave en la agricultura sostenible, ya que contribuyen a mejorar la fertilidad y la salud del suelo (Diacono et al., 2010). Estos insumos, derivados de estiércol,

residuos vegetales y otros desechos biodegradables, aportan nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes de manera gradual, mediada por la actividad de los microorganismos del suelo (Liu, et al., 2024). A diferencia de los fertilizantes sintéticos, su aplicación favorece propiedades físicas, químicas y biológicas al incrementar la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y la actividad microbiana, generando beneficios sostenidos en el tiempo. Además, su uso puede disminuir impactos ambientales asociados al empleo intensivo de fertilizantes químicos, como la degradación del suelo y las emisiones de gases de efecto invernadero, fortaleciendo la resiliencia de los sistemas agrícolas y promoviendo prácticas de manejo más amigables con el ambiente. (Matisic, M, et al., 2024)

Hawkesford et al. (2023) mencionan que los macronutrientes minerales esenciales como el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), azufre (S), calcio (Ca) y magnesio (Mg) son cruciales para el crecimiento y diversos procesos metabólicos en las plantas (Marschner, 2012). El nitrógeno en la síntesis de proteínas, ácidos nucleicos y clorofila; el fósforo en la transferencia de energía y en la formación de moléculas estructurales; el potasio ayuda en la regulación osmótica y en el control de la apertura y cierre de las estomas; además, el magnesio es parte de la molécula de clorofila y también participa en la síntesis proteica (Wdowiak et al., 2024). Por otro lado, el calcio es esencial para la estabilidad de las paredes celulares y membranas, y actúa como un señalizador ante estímulos ambientales. En cuanto al azufre, es un componente vital de aminoácidos y coenzimas (Kumar et al., 2021).

De acuerdo con, (Kirkby et al., 2023) el N, P y K participan en procesos clave como la síntesis de proteínas, el intercambio de energía, el metabolismo y la regulación del agua, mientras que S, Ca y Mg están implicados en la fotosíntesis, la formación de aminoácidos y la estabilidad estructural de los tejidos vegetales. Todos estos nutrientes deben mantenerse en un equilibrio adecuado en el suelo, ya que una nutrición balanceada, junto con buenas prácticas de fertilización, favorece una mejor absorción de nutrientes, aumenta el rendimiento y la calidad de los cultivos y ayuda a prevenir deficiencias nutricionales que podrían mostrarse a través de síntomas

como la clorosis, necrosis en las hojas y un desarrollo radicular deficiente. (Zewide et al., 2021)

La relevancia de los micronutrientes en los sistemas de producción hortícola, tienen una influencia directa sobre el rendimiento, la calidad del producto y la sostenibilidad de los cultivos (Ahmed et al., 2024). Los elementos como hierro, zinc, manganeso, cobre, boro y molibdeno, aun cuando se requieren en cantidades reducidas, desempeñan funciones esenciales en procesos fisiológicos fundamentales, incluyendo la fotosíntesis, la actividad enzimática y el metabolismo energético (Tripathi, D. K., et al., 2015)

Fertilizantes químicos

Das et al. (2023) indican que los fertilizantes químicos han sido esenciales para sostener altos rendimientos agrícolas al reponer los nutrientes extraídos por los cultivos; sin embargo, su uso excesivo ha generado impactos ambientales como contaminación del suelo y del agua, acumulación de sales y metales pesados, eutrofización y mayores emisiones de gases de efecto invernadero (Barquero et al., 2024). Además, estos insumos pueden alterar los ecosistemas del suelo y afectar la microbiota edáfica, por lo que se resalta la necesidad de adoptar estrategias de manejo de nutrientes y prácticas agrícolas sostenibles que equilibren la productividad con la conservación ambiental. (Benerjee, S. et al., 2019)

Los fertilizantes convencionales están formados por sustancias químicas o minerales que se aplican al suelo o de manera directa a los cultivos con el objetivo de suministrar los nutrientes necesarios para el correcto funcionamiento fisiológico y metabólico de las plantas (Yahaya et al., 2023). Su función principal es evitar o corregir deficiencias nutricionales, especialmente de nitrógeno, fósforo y potasio, los cuales son fundamentales para la producción de biomasa, el desarrollo del sistema radicular y el crecimiento general de los cultivos. En este sentido, el uso de fertilizantes permite aumentar y estabilizar la productividad, al aportar de forma

inmediata los nutrientes que el suelo no puede proporcionar en cantidades suficientes (Tagkas et al., 2024).

El estudio de Hernández et al. (2021) analizó cómo diferentes tipos de fertilización influyen en el suelo y en un cultivo de melón. Los resultados mostraron que los fertilizantes orgánicos mejoran notablemente la calidad del suelo, ya que aumentan el contenido de materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes y la actividad de microorganismos beneficiosos, lo que fortalece la estructura y el funcionamiento del suelo (Shin et al., 2024). Aunque los fertilizantes inorgánicos aportan nutrientes de forma rápida, la fertilización orgánica y las combinaciones de ambos lograron beneficios más completos sin afectar el rendimiento del cultivo. Esto demuestra que el uso de fertilizantes orgánicos es una alternativa eficaz para mantener la productividad agrícola y, al mismo tiempo, mejorar la salud del suelo de manera sostenible.

Fertilizantes fosfatados

El fósforo es un nutriente esencial para las plantas, pero su disponibilidad en el suelo suele ser limitada porque queda fijado a elementos como hierro y aluminio (Yang et al., 2024). Por esta razón, se ha recurrido ampliamente al uso de fertilizantes fosfatados químicos; sin embargo, solo una pequeña parte del fósforo aplicado es aprovechada por los cultivos (Syers et al., 2008), mientras que el resto se acumula en el suelo, afectando su estructura, la actividad microbiana y la sostenibilidad agrícola (Martínez Cerino et al., 2025).

Los fertilizantes fosfatados son insumos agrícolas diseñados para suministrar fósforo, un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que participa en procesos clave como la transferencia de energía, la división celular y la fotosíntesis (Odoom et al., 2024). Cuando se aplican de forma adecuada, mejoran la productividad de los cultivos al favorecer el desarrollo de raíces y tallos, estimular la floración y la formación de semillas, aumentar la tolerancia al estrés y promover un crecimiento más uniforme, gracias a una mayor disponibilidad de fósforo en el suelo (Cherlinka, 2025).

Zhang et al. (2025) exploran cómo el uso de fertilizantes fosfatados afecta la sostenibilidad agrícola y la eficiencia en el uso de nutrientes. Ellos enfatizan que la disponibilidad de fósforo depende tanto de las propiedades del suelo como de cómo se formule el fertilizante.

Los fertilizantes fosfatados son fundamentales para la agricultura mundial; sin embargo, su aprovechamiento por los cultivos suele ser bajo, ya que una gran parte del fósforo aplicado queda inmovilizado en el suelo y no es absorbido por las plantas (Bindraban et al., 2020). Esto limita la productividad agrícola y también puede generar impactos ambientales, como la acumulación de fósforo en los suelos y la posible contaminación de cuerpos de agua (Jin et al., 2023). Frente a esta situación, se plantea la necesidad de mejorar el diseño de los fertilizantes para aumentar la absorción del fósforo y disminuir las pérdidas al ambiente. Además, un plan de fertilización podría mejorar la incorporación de micronutrientes como zinc y hierro, mejorando la calidad nutricional de los alimentos (Amada Bandera et al., 2025). En conjunto, estos planteamientos resaltan la importancia de desarrollar nuevas estrategias de manejo que permitan reducir el uso de fósforo, aumentar su eficiencia y disminuir los impactos ambientales.

Hue et al (2024) señala que en la agricultura se emplean distintos tipos de fertilizantes fosfatados, tanto orgánicos como sintéticos. Los fertilizantes orgánicos, como la harina de hueso, la harina de pescado, el compost y la fosforita, liberan el fósforo de forma gradual y contribuyen a mejorar la estructura del suelo y su actividad biológica; no obstante, suelen presentar variabilidad en su contenido nutrimental y dependen en gran medida de la actividad microbiana para que el fósforo esté disponible para las plantas. (Jindo, K., et al 2023)

Yu et al. (2024) La optimización del fósforo aplicado depende de factores edáficos como la humedad del suelo, que condiciona su disponibilidad, así como del uso de herramientas de monitoreo para una fertilización de precisión. Asimismo, la

eficiencia de los fertilizantes fosfatados está estrechamente vinculada al método de aplicación, siendo la colocación localizada cercana a la semilla o a profundidad una estrategia que mejora la absorción y reduce pérdidas por escorrentía. La programación de la fertilización en función de variables climáticas contribuye a maximizar el uso del fósforo, minimizar impactos ambientales y mejorar la productividad agrícola (Cherlinka et al., 2024).

Coca Cuesta y colaboradores (2024) evaluaron fertilizantes fosfatados innovadores enriquecidos con promotores del crecimiento vegetal (PGPs), es decir, sustancias y microorganismos que estimulan el desarrollo vegetal y mejoran el aprovechamiento de nutrientes. Su objetivo fue incrementar la eficiencia agronómica del fósforo (P), entendida como la capacidad del cultivo para absorber y utilizar el P aplicado. Para ello, formularon mezclas a base de roca fosfática (fuente de liberación lenta) combinada con ácido indol-3-butírico, sustancias húmicas y *Trichoderma afroharzianum*, componentes que favorecen el crecimiento radicular y, con ello, aumentan la exploración del suelo y la absorción de P. En dos suelos contrastantes, las formulaciones con PGPs incrementaron la captación total de fósforo frente a fertilizantes sin aditivos; en suelo arenoso, las mezclas con sustancias húmicas, *Trichoderma* y ácido indol-3-butírico aumentaron la absorción en 26.5 %, 16.3 % y 12.2 %, respectivamente, respecto al control. (Tariq et al., 2024)

Fosfitos

Los fosfitos son compuestos derivados del ácido fosforoso que, aunque se comercializan como fertilizantes, se emplean principalmente en la agricultura como bioestimulantes y fungicidas, especialmente en aplicaciones foliares (Trejo-Téllez et al., 2024). Químicamente, presentan una estructura similar a la de los fosfatos, lo que permite su absorción por las plantas tanto vía radicular como foliar; sin embargo, no pueden ser utilizados directamente como fuente de fósforo disponible dentro de los tejidos vegetales (Li et al., 2025). No obstante, al incorporarse al suelo, ciertos microorganismos pueden transformarlos en formas de fósforo asimilables, lo que les confiere un potencial uso complementario a los fertilizantes fosfatados

convencionales. Asimismo, diversos estudios indican que los fosfitos pueden estimular el crecimiento vegetal y contribuir al control de enfermedades causadas por hongos, bacterias y otros patógenos, destacando su relevancia dentro de programas de fertilización y manejo integrado de cultivos (Morales-Morales et al. 2022).

Fertilización con MAP

El fosfato monoamónico (MAP) es un fertilizante sólido y granuloso que cuenta con una alta concentración de nitrógeno y fósforo, y se ha vuelto bastante popular entre los agricultores, especialmente en áreas con suelos calcáreos o alcalinos, gracias a su eficacia nutricional. (Sammartino, S., et al 2019) Este fertilizante actúa como una fuente de fósforo, y el nitrógeno que contiene ayuda a que el fósforo sea más accesible para las plantas, ya que minimiza su fijación en el suelo, lo que facilita su absorción por las raíces (McLachlan et al., 2024). Además, el MAP proporciona nutrientes esenciales que son clave para procesos como la síntesis de clorofila, lo que a su vez tiene un impacto positivo en el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Se sugiere usarlo tanto antes de sembrar como durante la siembra y el trasplante, ya que es menos agresivo con las semillas y las plántulas. También es compatible con la mayoría de los fertilizantes, lo que hace más fácil integrarlo en mezclas de fertilización equilibradas (Viveiros et al., 2025).

El fosfato monoamónico es una fuente de fósforo y nitrógeno caracterizado por su alta solubilidad y rápida absorción por las plantas, lo que lo convierte en una fuente eficiente de estos dos elementos vitales. Tal materia prima de especificación mejorada impulsará la nutrición de sus cultivos, aumentará el rendimiento y reducirá la cantidad de nutrientes que se pierden en el suelo (Lino et al., 2018). Además, la fuente del fosfato monoamónico es adecuada para la promoción de la agricultura sostenible, lo que se logra no solo a través de un mayor impulso del fertilizante, sino también de los suelos menos impactos dañinos y livianos (Yingfu de Yunnan, 2025). Una gestión adecuada del fósforo (P) en los suelos es clave para garantizar que los cultivos sean rentables (Kaiser y Pagliari, 2018). Al elegir un fertilizante fosfatado, hay que considerar factores como el tipo de cultivo, las propiedades del suelo y las

condiciones ambientales. A lo largo del tiempo, las fuentes comerciales de fertilizantes inorgánicos se han mejorado, aunque también hay opciones orgánicas disponibles. Sin embargo, las recomendaciones de aplicación suelen centrarse en las necesidades nutricionales de las plantas, sin importar de dónde provenga el fósforo (Zhang et al., 2025). La producción de fertilizantes fosfatados comienza con el tratamiento de la roca fosfórica para producir ácido fosfórico, que luego se convierte en productos como MAP o DAP, dependiendo de los reactivos utilizados (Zhang, et al., 2022). La disponibilidad del fósforo en estos fertilizantes se mide a través de su solubilidad en agua y en citrato de amonio, lo que indica la cantidad de este nutriente que las plantas pueden absorber tras la aplicación. Además, fuentes orgánicas como el estiércol y el compost también aportan cantidades significativas de fósforo, lo que ayuda a enriquecer la nutrición del suelo. (Santos, W. O., et al 2019)

Rodriguez et al. (2025) evaluaron la aplicación foliar de fosfato monoamónico (MAP) en soya cultivada en suelos tropicales con baja disponibilidad de fósforo (P). El MAP se aplicó en etapa vegetativa, reproductiva o en ambas, y se registraron indicadores fisiológicos y productivos (estado nutrimental, clorofila, actividad de Rubisco, intercambio gaseoso, estrés oxidativo y rendimiento). Souza et al. (2025) La fertilización foliar mejoró el desempeño fisiológico (mayor eficiencia fotosintética y uso de agua; menor estrés oxidativo) y aumentó el rendimiento, con mejores resultados cuando se aplicó en más de una etapa; aplicaciones tempranas en la fase reproductiva también fueron efectivas. En conjunto, el MAP foliar se presenta como una alternativa viable para incrementar la productividad en ambientes tropicales deficientes en P.

Fertilización con Ácido Fosfórico

Akhtar et al. (2016) estudiaron cómo se utiliza el fósforo en suelos calcáreos que tienen una reacción alcalina. En estos terrenos, los fertilizantes fosfatados granulares convencionales no son muy efectivos para los cultivos. Hashmi et al., (2017) En su investigación, probaron el uso de ácido fosfórico como una alternativa para aportar fósforo y encontraron que esto mejoró notablemente la absorción de

este nutriente en el trigo, lo que a su vez favoreció su crecimiento y aumentó los rendimientos. Los hallazgos sugieren que optar por fuentes de fósforo que sean más solubles es una forma efectiva de mejorar la nutrición fosfatada y la productividad agrícola en suelos que presentan limitaciones, convirtiéndose en una opción viable frente a la baja efectividad de los fertilizantes tradicionales.

Broschat (2006) exploró cómo el ácido fosfórico y el ácido fosforoso afectan el crecimiento y la absorción de fósforo en plantas ornamentales tropicales que crecen en macetas. En su estudio, evaluó diferentes especies al aplicar fósforo en el suelo, utilizando soluciones de ácido fosfórico, ácido fosforoso y mezclas con fungicida. Los hallazgos mostraron que los tratamientos que ofrecían cantidades similares de fósforo, ya fuera del ácido fosfórico o de fertilizantes con ácido fosforoso, estimularon un mejor desarrollo de raíces y brotes, además de aumentar las concentraciones de fósforo en las hojas, en comparación con los grupos de control que no recibieron fósforo o que solo tuvieron fungicida.

Mohammad, Hammouri y Ferdows (2004) analizaron el calabacín de verano utilizando riego por goteo, comparando la fertirrigación fosfatada con la aplicación convencional al suelo, empleando dosis de hasta 90 mg P L^{-1} . Los resultados mostraron que la fertirrigación aumentó el rendimiento, el número de frutos y la absorción de fósforo, además de ser más eficiente en el uso del fertilizante, aunque esta eficiencia disminuyó con dosis más altas. También se observó que el riego provocó una ligera acidificación del suelo en los primeros 15 cm, mientras que la fertilización convencional logró distribuir el P en los 30 cm superiores. Los autores concluyeron que dosis bajas de P aplicadas por fertirrigación fueron suficientes para lograr el máximo rendimiento y eficiencia, superando a la fertilización realizada antes de la siembra.

Zúñiga-Estrada et al. (2025) estudiaron cómo se comporta el fósforo en un suelo tipo Vertisol en el norte de México usando dos fuentes de fósforo: superfosfato triple de calcio (SFT) y ácido fosfórico (H_3PO_4). Al analizar los datos con la isoterma de

Langmuir, calcularon que la capacidad máxima de retención de fósforo del suelo era de 1080 mg kg⁻¹ al usar SFT y de 1030 mg kg⁻¹ con ácido fosfórico. Hashmi et al. (2017) Los resultados mostraron que el fósforo del ácido fosfórico tenía una disponibilidad inicial mucho mayor, con concentraciones solubles que eran el doble de las que se registraron con el superfosfato triple. Sin embargo, tras 24 horas, cerca del 94 % del fósforo aplicado ya estaba adsorbido en el suelo, sin importar la fuente, lo cual confirma la gran capacidad de fijación típica de los Vertisoles. Por otro lado, el SFT liberó el fósforo más lentamente, lo que lo hace ideal para aplicaciones de fondo, mientras que el ácido fosfórico es más beneficioso en sistemas agrícolas intensivos gracias a su mayor disponibilidad inicial. (Syers et al., 2008).

Brunings et al. (2005) señalan en su estudio que, aunque los agricultores suelen estar al tanto de los fertilizantes fosfatados, muchas veces hay confusión entre el ácido fosfórico (H₃PO₄) y el ácido fosforoso (H₃PO₃) debido a sus nombres similares, aunque tienen propiedades diferentes. El artículo analiza varios compuestos de fósforo utilizados en la agricultura y aclara que el ácido fosfórico es la forma completamente oxidada del nutriente que las plantas pueden absorber como ortofosfato. Por otro lado, el ácido fosforoso está parcialmente oxidado y tiene un comportamiento químico distinto.

Brócoli

El brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) es una hortaliza perteneciente a la familia Brassicaceae de gran relevancia a nivel mundial, tanto por su valor nutricional como por su importancia económica y agronómica. Este cultivo es reconocido por su alto contenido de compuestos bioactivos como glucosinolatos, compuestos fenólicos, vitaminas y fibra, los cuales contribuyen a sus propiedades funcionales en la dieta humana. Desde el punto de vista productivo, se desarrolla principalmente en climas templado-fríos y su órgano de aprovechamiento comercial corresponde a la inflorescencia inmadura o “cabeza”, acompañada del tallo. Además, durante su producción se genera una cantidad considerable de biomasa no comercial (hojas,

tallos y raíces), la cual representa una oportunidad para su aprovechamiento en procesos agroindustriales bajo esquemas de economía circular (Quizhpe et al., 2024).

A nivel mundial, el brócoli se ha consolidado como una de las hortalizas crucíferas más importantes. De acuerdo con Quizhpe et al. (2024) y FAO (2024), la producción global conjunta de brócoli y coliflor alcanzó aproximadamente 26 millones de toneladas en 2022. En este contexto, China e India dominan la producción con cerca del 81 % del total, mientras que países como España, Italia, Estados Unidos y México contribuyen con alrededor del 8.2 %. De manera complementaria, Eugui et al. (2025) reportan que existen cerca de 1.4 millones de hectáreas destinadas a este cultivo a nivel mundial, lo que refleja un crecimiento sostenido y confirma su relevancia en los sistemas agrícolas actuales.

En México, la producción de brócoli también ha mostrado un crecimiento significativo. Manríquez-Zúñiga et al. (2023) señalan que en 2017 se alcanzó una producción aproximada de 567,000 toneladas, con una superficie cultivada cercana a 32,000 hectáreas. La producción presenta una distribución geográfica desigual, concentrándose principalmente en el estado de Guanajuato, que aporta más del 65 % del total nacional, seguido por Michoacán y Baja California. Otros estados como Jalisco, Puebla y Querétaro participan en menor proporción López Díaz (2015–2017).

El desarrollo del cultivo está estrechamente relacionado con su fenología y con las condiciones ambientales. De manera general, el ciclo del brócoli se divide en dos fases principales: la etapa vegetativa, que va desde el trasplante hasta la inducción floral, y la etapa reproductiva, que comprende desde la formación de la cabeza hasta la cosecha. Estas fases responden de manera diferenciada a factores como la temperatura, la radiación y la disponibilidad de agua, lo que genera variabilidad en el rendimiento y la calidad del producto (Siomos et al., 2022; Cammarano et al., 2020). La temperatura es el factor más determinante, ya que se desarrolla mejor en

temperaturas cercanas a 16 °C, con un rango óptimo de 15 a 25 °C, aunque puede tolerar temperaturas bajas antes de la formación de la inflorescencia valores elevados pueden afectar la diferenciación del meristemo y deteriorar la calidad de la cabeza, además de existir diferencias genotípicas en la tolerancia al calor (Koularmanis et al., 2025).

El desarrollo vegetativo juega un papel fundamental en el rendimiento final, debido a que características como el número de hojas, área foliar y acumulación de biomasa determinan la capacidad fotosintética del cultivo. Factores como la disponibilidad de agua, la temperatura y la radiación influyen directamente en este proceso, afectando tanto el crecimiento vegetativo como la calidad del producto final Akter et al. (2025). (Koularmanis et al., 2025). En este sentido, la selección de genotipos adaptados y el manejo adecuado del cultivo son estrategias clave para optimizar la producción.

El brócoli destaca por su alto valor nutricional, ya que contiene vitaminas C y K, vitaminas del complejo B, minerales esenciales como calcio, hierro y zinc, así como fibra y compuestos antioxidantes. Entre estos últimos se incluyen glucosinolatos, flavonoides y carotenoides, los cuales están asociados con la prevención de enfermedades crónicas (Nagraj et al., 2020). Además, no solo la inflorescencia, sino también los subproductos del cultivo contienen compuestos de interés, lo que ha impulsado su aprovechamiento en la industria alimentaria y farmacéutica (Quizhpe et al., 2024).

Coliflor

La coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) es una hortaliza de la familia Brassicaceae ampliamente reconocida por su valor nutricional, funcional y económico. Su importancia radica en el alto contenido de compuestos bioactivos como glucosinolatos, compuestos fenólicos y flavonoides, los cuales presentan propiedades antioxidantes y están asociados con la prevención de enfermedades crónicas (Drabińska et al., 2021). Además, no solo la inflorescencia, sino también

hojas y tallos contienen estos compuestos, lo que incrementa el potencial de aprovechamiento integral del cultivo. Sin embargo, procesos como la cocción pueden reducir significativamente su concentración debido a la degradación térmica (Kapusta-Duch et al., 2016).

A nivel mundial, la coliflor, junto con el brócoli, constituye uno de los cultivos hortícolas más importantes, con una producción cercana a 26 millones de toneladas en aproximadamente 1.4 millones de hectáreas Helgi Library (2024). China e India lideran la producción global, seguidos por países como Estados Unidos, España, México, Italia, Polonia y Francia, lo que demuestra su amplia distribución y relevancia en la seguridad alimentaria mundial.

En México, la coliflor tiene una importancia destacada tanto para el consumo interno como para la exportación, principalmente hacia Estados Unidos y Canadá Gobierno de México (2022). La producción se concentra en estados como Guanajuato, Puebla e Hidalgo, con volúmenes de 30,133, 19,778 y 16,761 toneladas respectivamente en 2023, lo que refleja su importancia regional en el sector hortícola SIAP (2024). El desarrollo del cultivo está determinado por su fisiología y fenología, altamente influenciadas por factores ambientales. El estrés térmico afecta procesos celulares fundamentales como la respiración y la síntesis de ATP, mientras que el estrés hídrico reduce la biomasa, el contenido de agua y el rendimiento (Rurek et al., 2015). No obstante, la aplicación de compuestos como el α -tocoferol puede mejorar la tolerancia al estrés y favorecer el desarrollo del cultivo (Zafar et al., 2024).

Desde el punto de vista fenológico, la inducción de la pella depende en gran medida de la temperatura y la genética. La vernalización es esencial para activar la floración, mientras que temperaturas elevadas pueden retrasar o alterar este proceso (Guo et al., 2004; Matschegewski et al., 2015). Asimismo, el uso de reguladores de crecimiento influye en la elongación del tallo y la formación floral, evidenciando la interacción entre factores hormonales, ambientales y genéticos.

El desarrollo vegetativo está estrechamente ligado al manejo nutricional. La combinación de fertilización orgánica e inorgánica mejora significativamente el crecimiento, el rendimiento y la calidad comercial del cultivo (Abdel-Razzak & El-Nasharty, 2008; Ranjous et al., 2025). Este manejo integrado optimiza la absorción de nutrientes y promueve un crecimiento más eficiente.

La coliflor destaca por su alto valor nutricional, ya que contiene vitaminas como la vitamina C y del complejo B, además de compuestos antioxidantes. Existen diferencias entre genotipos, donde variedades amarillas presentan mayor contenido de carotenoides y vitamina C, mientras que las púrpuras contienen más antocianinas y flavonoides, lo que incrementa su valor funcional (Rahman et al., 2023; Anika et al., 2025). En conjunto, estos atributos consolidan a la coliflor como un alimento funcional de gran relevancia para la salud y la agricultura.

Repollo

El repollo (*Brassica oleracea* var. *capitata*) es una hortaliza herbácea de la familia Brassicaceae ampliamente cultivada por su “cabeza” o cogollo compacto, que constituye su principal órgano comercial. Aunque botánicamente es una especie bienal, en la práctica agrícola se maneja como anual debido a que su ciclo productivo finaliza con la cosecha de la cabeza (Fornaris Rullán, 2014; Zamora, 2016). Su importancia radica tanto en su valor alimentario como en su relevancia económica dentro del grupo de las brassicas.

A nivel mundial, la producción de repollo se concentra principalmente en Asia, región que aporta más del 75 % del área cosechada, destacando China como el principal productor (Cartea et al., 2011). En términos productivos, China, India y Rusia lideran la producción global con 35.0, 9.3 y 2.6 millones de toneladas, respectivamente, mientras que países como Corea también figuran entre los principales productores (Greer et al., 2023). En conjunto, la producción mundial ha alcanzado alrededor de 71 millones de toneladas, lo que refleja la importancia de este cultivo a escala global (Liu et al., 2024).

En México, el repollo mantiene relevancia económica, con una producción de 194,748 toneladas en 2024 en una superficie de 5,771 ha, y un rendimiento promedio de 33.7 t ha⁻¹. La producción se concentra principalmente en Puebla, que aporta más del 40 % del total nacional, seguido por Michoacán, Chiapas, Sonora y Baja California. Esta distribución evidencia una fuerte concentración regional del cultivo.

El desarrollo del cultivo está determinado por su fenología y condiciones ambientales. El ciclo comprende etapas desde la plántula hasta la formación de la cabeza, con una duración aproximada de 92 a 95 días. Durante este proceso, se distinguen fases como plántula, roseta, plegado y formación del cogollo, donde el crecimiento y superposición de hojas permiten la formación de una cabeza compacta Paredes Tuesta (2014), (Liu et al., 2024).

El desarrollo vegetativo depende de factores ambientales y de manejo agronómico. El estrés térmico puede afectar procesos como la fotosíntesis y el crecimiento foliar, mientras que prácticas como el espaciamiento adecuado y la aplicación de micronutrientes favorecen el crecimiento y el rendimiento del cultivo (Rodríguez et al., 2015; Rana et al., 2019).

El repollo posee un alto valor nutricional debido a su contenido de fibra, vitamina C y compuestos bioactivos como glucosinolatos y fenólicos, los cuales presentan propiedades antioxidantes. Estos compuestos pueden incrementarse mediante el uso de elicitores, especialmente en brotes, lo que resalta su potencial como alimento funcional (Torres Fernández, 2024).

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del sitio experimental

La investigación fue realizada en el periodo de noviembre del 2024 a junio de 2025. en el área experimental de campo abierto del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila. México. El área experimental fue de aproximadamente 560 m² y tenía la implementación de un sistema de riego por goteo, el cual se instaló en noviembre de 2024 a 2025.

Descripción de Tratamientos

Se evaluaron dos formas de fertilizantes fosfatados solubles (Fosfato monoamónico MAP, NH_4HPO_4 , y ácido Fosfórico H_2PO_4 , en tres cultivos de *Brassicaceas* (Brócoli, Coliflor y repollo). En total fueron seis tratamientos y cada tratamiento se evaluó en tres repeticiones, bajo un diseño factorial y bloques completos al azar (Cuadro 1). Cada repetición constó de 160 plantas, plantadas a doble hilera a una distancia de 0.3 m entre hileras y entre plantas, en surcos a suelo desnudo de 40 m de longitud y a una separación de 1.4 m.

Cuadro 1. Tratamientos evaluados

No	Factor A	Factor B
1	MAP	Brócoli
2	MAP	Coliflor
3	MAP	Repollo
4	Ácido Fosfórico	Brócoli
5	Ácido Fosfórico	Coliflor
6	Ácido Fosfórico	Repollo

Aplicación de tratamientos

Con base en la solución Hoagland (Hoagland & Arnon, 1950). Se elaboró una solución al 75%. En el caso de fósforo, se utilizó ácido fosfórico al 85% y MAP, respectivamente. Esta solución se utilizó durante todo el cultivo.

Descripción de Actividades

Producción de plántula y trasplante

Las plantas se produjeron con semillas de brócoli F1 *Avengers*®, repollo F1 *Blue vantage*® (Sakata, 2004) y coliflor F1 *David*® (Seminis, 2003). Se emplearon charolas de poliestireno de 200 cavidades como sustrato peat-moss.

Preparación del terreno

Se prepararon surcos a suelo desnudo de 40 m de largo y una separación de 1.4 m., con riego por goteo, con cintilla Toro® calibre 6 mil con emisores a 0.2m y un gasto de 1.013 L h⁻¹



Imágenes 0.2



Imágenes 0.1

Trasplante

El trasplante se realizó de forma manual en los días 09 y 10 de diciembre 2024.



Imagenes 0.3

Variables evaluadas

Crecimiento

Se realizaron cuatro mediciones durante el cultivo, tomando cinco plantas completas (incluyendo raíz) al azar por cada repetición, a las cuales se les midió:

Diámetro del tallo (DT). Se midió a un cm., por encima del suelo, con un vernier digital, Hisemy®. La medición fue en milímetros.

Número de hojas (NH) y Peso de hojas (PH). Para el caso de brócoli y coliflor. Se cortó la inflorescencia y posteriormente, se separaron las hojas del tallo, para el caso de repollo se cortó la “cabeza”, dejando solo las hojas expandidas y en una balanza digital RHINO®.

Ancho (AH) y largo de las hojas (LH). Para estas variables se tomaron las hojas más grandes de cada planta y se midió la parte más ancha y la longitud de la lámina foliar.

Peso del tallo (PT). Una vez separadas las hojas, se pesó el tallo en una balanza electrónica RHINO®.

Peso de la raíz (PR). Las plantas se “arrancaron” de forma manual, se separó la raíz y se lavó agitando en un bote con agua. Posteriormente se pesaron en una balanza electrónica RHINO®.

Productividad y calidad

Se realizó al momento de la cosecha y se consideraron todas las plantas de la repetición para rendimiento y para calidad se seleccionaron cinco inflorescencias para brócoli y coliflor, cinco bolas para repollo.

Peso de la inflorescencia o “pella” (PI). Para brócoli y coliflor se cortaron las inflorescencias y se pesaron y para el caso de repollo se cortó la bola dejando solo las tres hojas que empezaron a expandirse. Se utilizó una balanza RHINO®.

Diámetro de la inflorescencia y “bola” (DIB). El diámetro de cada inflorescencia y la bola de repollo, se tomaron dos medidas del diámetro y se reportó la media.

Análisis de datos

A los datos obtenidos se les realizó un análisis de varianza ($P \geq 0.05$) y una prueba de comparación LSD Fisher . Se utilizó el modelo de bloques completos al azar y el software Infostat.



Imagenes 0.2



Imagenes 0.4



Imagenes 0.5

RESULTADOS

Brócoli

Los resultados obtenidos en el cultivo de brócoli (Cuadro 2) fueron los siguientes: en la primera evaluación se observó un mayor número de plantas (70.5), el MAP presentó mayor peso de hojas (42.08 g), mayor ancho de hoja foliar (18.5 cm) y mayor diámetro de inflorescencia (28.4 cm), mientras que el H_3PO_4 mostró un mayor peso de inflorescencia (3020.25 g). Además, en el ancho de hoja se encontraron diferencias estadísticas significativas, donde MAP alcanzó el valor más alto (18.5 cm) respecto al H_3PO_4 (17.45 cm). Esto indica que el MAP favoreció un mayor desarrollo vegetativo, mientras que el ácido fosfórico promovió una mayor acumulación de biomasa en la inflorescencia.

En las evaluaciones posteriores del brócoli, el MAP mantuvo mejores resultados en variables relacionadas con el peso y diámetro de la inflorescencia, especialmente en la segunda y tercera evaluación, donde superó notablemente al H_3PO_4 en peso de inflorescencia. Por otro lado, el H_3PO_4 mostró mayores valores en ancho y longitud de hojas en algunas evaluaciones, lo cual evidencia que esta fuente favoreció parcialmente el crecimiento vegetativo. No obstante, los coeficientes de variación elevados en algunas variables, principalmente en número de brócolis cosechados, indican una alta variabilidad experimental.

En la cuarta evaluación se observó una reducción considerable en el peso de inflorescencia, debido ya al cierre del ciclo del cultivo. El H_3PO_4 presentó mayor peso de inflorescencia (191.79 g), superando al MAP (154.39) a pesar de ello, el MAP mantuvo valores competitivos en diámetro y desarrollo vegetativo.

Cuadro 2. Evaluación de MAP Y H_3PO_4 en el cultivo de brócoli.

Primera Evaluación

Tratamiento	Hojas				Inflorescencia	
	Numero	Peso (g)	Longitud	Ancho (cm)	Peso (g)	Diámetro
	de Brócoli		(cm)			(cm)
MAP	70.5	42.08	24.75	18.5 a	274.95	28.4
H ₃ PO ₄	40.5	27.6	24.2	17.45 b	320.25	26.43

CV	14.91	22.22	6.25	0.62	7.08	6.31
----	-------	-------	------	------	------	------

Segunda Evaluación

Tratamiento	Hojas			Inflorescencia		
	Numero de Brócoli	Peso (g)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Peso (g)	Diámetro (cm)
MAP	47.5	33.63	25.3	16.2	314.45	21.7
H ₃ PO ₄	28	36	26	17.05	278.33	17.25
CV	57.93	28.58	17.8	21.66	20.54	12.16

Tercera Evaluación

Tratamiento	Hojas			Inflorescencia		
	Numero de Brócoli	Peso (g)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Peso (g)	Diámetro (cm)
MAP	44.5	38.25	25.35	14.8	233.9	21.37
H ₃ PO ₄	20	37	27.4	17.75	204.79	18.91
CV	58.69	18.46	17.01	15.97	10.36	13.44

Cuarta Evaluación

Tratamiento	Hojas			Inflorescencia		
	Numero de Brócoli	Peso (g)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Peso (g)	Diámetro (cm)
MAP	33	38.13	20.75	17.15	154.39 a	15.83
H ₃ PO ₄	30.5	37.25	22	16.5	191.79 b	16.46
CV	11.02	16.27	24.11	24.56	1.7	5.27

Coliflor

En el cultivo de coliflor (Cuadro 3), durante la primera evaluación el fosfato monoamónico presentó los mayores valores en número de plantas (15.5), longitud de hoja (46 cm) con diferencias altamente significativas respecto al ácido fosfórico (37.1 cm), así como en ancho de hoja. En contraste, el H₃PO₄ mostró un peso de hojas ligeramente superior y mayor peso de inflorescencia (811.31 g) comparado con el MAP (461.02 g), lo que sugiere una mejor eficiencia del H₃PO₄ en la formación de la pella. En la segunda evaluación, el H₃PO₄ mostró mejores resultados en peso de hojas, longitud y ancho foliar, así como en peso de

inflorescencia, aunque el MAP mantuvo un mayor diámetro de inflorescencia. Esto demuestra que ambos fertilizantes tuvieron respuestas variables dependiendo de la etapa fenológica del cultivo.

Cuadro 3. Evaluación de MAP Y H_3PO_4 en el cultivo de coliflor.

Primera evaluación

Tratamiento	Hojas				Inflorescencia	
	Numero de Coliflor	Peso (g)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Peso (g)	Diámetro (cm)
MAP	15.5	52.88	46 b	20.45	461.02	12.36
H_3PO_4	11.5	53.25	37.1 a	19.5	811.31	12.61
CV	48.29	23.42	3.58	11.89	60.89	7.51

Segunda evaluación

Tratamiento	Hojas				Inflorescencia	
	Numero de Coliflor	Peso (g)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Peso (g)	Diámetro (cm)
MAP	33	26.75	26.35	17.45	124.32	12.31
H_3PO_4	44	35	27	18.5	139.92	11.32
CV	20.94	14.6	17.02	9.88	21.89	6.24

Repollo

En el cultivo de repollo (Cuadro 4), el H_3PO_4 presentó mejores resultados en varias variables vegetativas durante la primera evaluación, destacando en peso de hojas, longitud y ancho foliar, así como en peso del tallo. Sin embargo, el H_3PO_4 mostró un peso de cabeza considerablemente superior (1801 g) respecto al MAP (1686.17 g), evidenciando una mejor respuesta en la formación del órgano comercial. En la segunda evaluación, el H_3PO_4 presentó diferencias estadísticas significativas en peso de raíz, alcanzando el mayor valor (66.5 g), lo cual sugiere un mejor desarrollo radicular asociado posiblemente a la rápida disponibilidad del fósforo en solución. Asimismo, el H_3PO_4 mostró mayores valores en diámetro de inflorescencia y crecimiento foliar, mientras que el MAP mantuvo mejores resultados en peso de inflorescencia.

Cuadro 4. Evaluación de MAP Y H_3PO_4 en el cultivo de repollo.

Primera Evaluación	Raíz Peso (kg)	Tallo			Hojas		
		Peso (g)	Diámetro (cm)	Numero	Peso (g)	Longitud (cm)	Ancho (cm)
Tratamiento							
MAP	81.17	80.83	40.54	15.27	1126.67	33.89	30.88
H ₃ PO ₄	84	99	39.61	15	1217	35.92	32.14
CV	14.47	21.95	4.39	15.83	17.53	14.56	15.88

Primera Evaluación	Bola o Cabeza	
	Peso (g)	Diámetro (cm)
Tratamiento		
MAP	1686.17	15.5
H ₃ PO ₄	1801	15.46
CV	17.65	7.67

Segunda Evaluación	Bola o Cabeza	
	Peso (g)	Diámetro (cm)
Tratamiento		
MAP	1519.7	13.59 a
H ₃ PO ₄	1411	14.33 b
CV	13.67	4.93

Discusión

En el cultivo de Brócoli se observó que el fertilizante MAP presentó mejores resultados en variables relacionadas presenta mayor número de plantas, mayor peso foliar, mayor ancho de hoja y mayor diámetro de inflorescencia. Estas respuestas sugieren que el MAP favoreció un crecimiento vegetativo. En la primera evaluación, el MAP alcanzó un mayor ancho de hoja (18.5 cm) respecto al H_3PO_4 (17.45 cm), mostrando diferencias estadísticas significativas. Asimismo, en las evaluaciones posteriores el MAP mantuvo mayores valores de peso y diámetro de inflorescencia, lo que indica una respuesta positiva del cultivo hacia esta fuente fosfatada. Por otro lado, el H_3PO_4 mostró mayor peso de inflorescencia en la primera evaluación, Sin embargo, en las evaluaciones posteriores el MAP superó nuevamente al H_3PO_4 en peso y diámetro de inflorescencia, especialmente en la segunda y tercera evaluación, donde mantuvo mayor estabilidad productiva. Esto sugiere que el MAP tuvo una liberación más sostenida y un aprovechamiento más eficiente durante gran parte del ciclo del cultivo.

En la cuarta evaluación del brócoli se observó una reducción general del peso de inflorescencia. En esta etapa el H_3PO_4 presentó mayor peso de inflorescencia respecto al MAP, lo que podría indicar que en fases finales del cultivo la disponibilidad inmediata del fósforo favoreció la acumulación residual de biomasa en las inflorescencias restantes. Sin embargo, el MAP continuó mostrando valores competitivos en diámetro y características vegetativas, evidenciando estabilidad agronómica.

Mc Lachlan et al., (2024). Menciona que este comportamiento puede explicarse debido a que el MAP (fosfato monoamónico) aporta fósforo altamente soluble junto con nitrógeno amoniacal, favoreciendo la síntesis de proteínas, el crecimiento vegetativo y la formación de estructuras reproductivas. Los resultados coinciden con lo reportado por Mohamed (2021), quienes evaluaron diferentes fuentes de fósforo en brócoli y encontraron que el MAP incrementó significativamente el crecimiento

vegetativo, diámetro de cabeza y rendimiento del cultivo debido a la mayor disponibilidad de fósforo y eficiencia en absorción nutrimental. Asimismo, Nunes et al. (2022) mencionan que el MAP mejora la eficiencia del uso del fósforo en el suelo, favoreciendo su difusión y disponibilidad para las raíces, especialmente en cultivos con alta demanda nutrimental como las brásicas

En el cultivo de coliflor se observó un comportamiento variable entre ambas fuentes fosfatadas, ya que tanto el MAP como el ácido fosfórico (H_3PO_4) mostraron efectos positivos dependiendo de la variable evaluada. En la primera evaluación, el MAP presentó mayores valores en número de plantas, longitud y ancho foliar, mostrando diferencias altamente significativas en longitud de hoja, mientras que en la segunda evaluación el H_3PO_4 mostró ligeras ventajas en peso foliar, longitud y ancho de hoja, así como en peso de inflorescencia.

El H_3PO_4 registró mayor peso de inflorescencia y ligeramente mayor peso foliar, lo cual sugiere una mayor eficiencia en la formación de inflorescencia. Esta respuesta podría asociarse a que el fósforo disponible inmediatamente favorece procesos energéticos y metabólicos relacionados con la diferenciación y compactación de la inflorescencia. Además, la coliflor es un cultivo altamente exigente en fósforo durante la formación de la pella, por lo que una fuente rápidamente soluble puede generar respuestas positivas en el rendimiento comercial. Lo que nos indica que el H_3PO_4 favoreció mayor acumulación de biomasa y crecimiento general, mientras que el MAP contribuyó a mantener estructuras de inflorescencia más compactas y de mayor diámetro.

En el cultivo de Repollo el ácido fosfórico mostró en la primera evaluación destacó en peso de hojas, longitud y ancho foliar, peso de tallo y peso de cabeza. El mayor peso de cabeza alcanzado con H_3PO_4 indica una mejor eficiencia en la formación y compactación del repollo, particularmente en la segunda evaluación, donde presentó un mayor peso de raíz (66.5 g) con diferencias estadísticas significativas respecto al MAP (55 g). Este comportamiento sugiere que el repollo respondió

favorablemente a la rápida disponibilidad de fósforo proporcionada por el H_3PO_4 , especialmente en el desarrollo radicular. Aunque el MAP mostró mayores valores en algunas variables como peso de inflorescencia en la primera evaluación, el ácido fosfórico presentó un comportamiento más favorable en el desarrollo radicular y variables vegetativas del repollo. Esto puede indicar que el repollo aprovechó mejor el fósforo disponible de forma inmediata proporcionado por el H_3PO_4 , mientras que el MAP tuvo un efecto más orientado hacia la producción de biomasa aérea.

Los resultados coinciden parcialmente con estudios donde se menciona que las fuentes líquidas de fósforo mejoran la absorción temprana y estimulan el crecimiento de raíces en cultivos hortícolas. Asimismo, Cámara-Martos et al. (2021) destacan que las brásicas presentan una alta demanda de fósforo y micronutrientes debido a la intensa actividad metabólica y acumulación de compuestos bioactivos en hojas y estructuras comerciales.

Conclusión

La aplicación de MAP y Ácido fosfórico bajo las condiciones del estudio presentan que tanto brócoli, coliflor y repollo muestran que el MAP como el ácido fosfórico (H_3PO_4) aportan fósforo, pero su eficacia varía según el cultivo y la variable evaluada. El brócoli respondió mejor al MAP, con mayor desarrollo foliar, diámetro y peso de la inflorescencia, probablemente por el aporte combinado de fósforo y nitrógeno; en coliflor, ambos fertilizantes tuvieron efectos similares, con ligera ventaja del H_3PO_4 en peso de inflorescencia. En cambio, el repollo respondió mejor al H_3PO_4 , sobre todo en desarrollo radicular, debido a su alta solubilidad y disponibilidad rápida de fósforo. En conjunto, se concluye que no existe un fertilizante “universalmente” superior: la fuente fosfatada debe elegirse según las necesidades del cultivo para optimizar crecimiento, rendimiento y uso de fertilizantes el cual puede depender de factores agronómicos, económicos y del sistema de manejo del cultivo.

REFERENCIAS

- Abdel-Razzak, H. S., & El-Nasharty, A. B. (2008). Vegetative growth and yield potential of cauliflower (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.) plants as affected by inorganic and organic nitrogen fertilization. *Alexandria Science Exchange Journal*, 29(4), 325–339. https://www.researchgate.net/publication/350293263_Vegetative_Growth_and_Yield_Potential_of_Cauliflower_Brassica_oleraceae_var_botrytis_L_Plants_as_Affected_by_Inorganic_and_Organic_Nitrogen_Fertilization
- AgriCenter Zevilla. (s. f.). MAP 11-52-00 (fosfato monoamónico). <https://www.agricenter.com.mx/productos/fertilizantes/formulados/map-11-52-00>
- Ahmed, N., Zhang, B., Chachar, Z., Li, J., Xiao, G., Wang, Q., Hayat, F., Deng, L., Narejo, M. U. N., Bozdar, B., & Tu, P. (2024). Micronutrients and their effects on horticultural crop quality, productivity and sustainability. *Scientia Horticulturae*, 323, 112512. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112512>
- Ahmed, N., Zhang, B., Chachar, Z., Li, J., Xiao, G., Wang, Q., Hayat, F., Deng, L., Narejo, M. U. N., Bozdar, B., & Tu, P. (2024). Micronutrients and their effects on horticultural crop quality, productivity and sustainability. *Scientia Horticulturae*, 323, 112512. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112512>
- Akhtar, M., Yaqub, M., Naeem, A., Ashraf, M., & Espinosa-Hernández, V. (2016). Improving phosphorus uptake and wheat productivity by phosphoric acid application in alkaline calcareous soils. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(11), 3701–3707. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7555>
- Akter, A., Akhter, S., & Hossain, M. M. (2025). Water stresses alter the growth, yield and quality of broccoli (*Brassica Oleracea* var. *italica*). *Scientific Reports*, 15(1), 40107. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-23905-z>
- Amanda Bandara, R. M. B., & Dissanayaka, D. M. S. B. (2025). Agronomic biofortification of vegetables to achieve iron and zinc nutritional security in food systems. *Journal of Plant Nutrition*, 48(6), 974–994. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2416075>
- Anika, S. A., Rahman, M. M., Mannan, M. A., & Kabir, M. Y. (2025). Evaluation of physicochemical attributes of three cauliflower (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.)

varieties. *Journal of the Bangladesh Agricultural University*, 23(3), 419–424.
<https://doi.org/10.3329/jbau.v23i3.84460>

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*, 4, 100182. <https://doi.org/10.1016/j.envpolm.2024.100182>

Assunção, A. G. L., Cakmak, I., Clemens, S., González-Guerrero, M., Nawrocki, A., & Thomine, S. (2022). Micronutrient homeostasis in plants for more sustainable agriculture and healthier human nutrition. *Journal of Experimental Botany*, 73(6), 1789–1799. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac014>

Banerjee, S., Walder, F., Büchi, L., Meyer, M., Held, A. Y., Gattinger, A., Keller, T., Charles, R., & van der Heijden, M. G. A. (2019). Agricultural intensification reduces microbial network complexity and the abundance of keystone taxa in roots. *The ISME Journal*, 13(7), 1722–1736. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0383-2>

Barati, M., McLaren, T. I., Janke, C., Diffey, S., Reading, M. J., Gibson, A., & Rose, T. J. (2026). Agronomic phosphorus fertiliser value of animal manures is comparable to monoammonium phosphate for wheat production. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 396, 109973. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109973>

Barquero, M., Cazador, C., Ortiz-Liéban, N., Zotti, M., Brañas, J., & González-Andrés, F. (2024). Fertilising maize with bio-based mineral fertilisers gives similar growth to conventional fertilisers and does not alter soil microbiome. *Agronomy*, 14(5), 916. <https://doi.org/10.3390/agronomy14050916>

Bastida Cañada, O. A. (2026). Estadísticas de producción de repollo en México. Blog Agricultura. Disponible en: <https://blogagricultura.com/estadisticas-repollo-mexico/>

Bindraban, P. S., Dimkpa, C. O., & Pandey, R. (2020). Exploring phosphorus fertilizers and fertilization strategies for improved human and environmental health. *Biology and Fertility of Soils*, 56(3), 299–317. <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01430-2>

Bindraban, PS, Dimkpa, C., Nagarajan, L. et al. Revisando fertilizantes y estrategias de fertilización para mejorar la absorción de nutrientes por las plantas. *Biol Fertil Soils* 51 , 897–911 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1039-7>

- Boru, M. (2025). Review of organic fertilizer and its role in organic farming. *International Journal of Energy and Environmental Science*, 10(2), 31–37. <https://doi.org/10.11648/j.ijees.20251002.11>
- Broschat, T. K. (2006). Effects of phosphorous and phosphoric acids on growth and phosphorus concentrations in container grown tropical ornamental plants. *HortTechnology*, 16(1), 105–108. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.16.1.0105>
- Brownrigg, S., McLaughlin, MJ, McBeath, T. *et al.* Efecto de enmiendas acidificantes sobre la disponibilidad de P en suelos calcáreos. *Nutr Cycl Agroecosyst* **124** , 247–262 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10705-022-10241-1>
- Cabbage | Tierras y Aguas | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s. f.). <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/cabbage/es/>
- Cámara-Martos, F., Obregón-Cano, S., Mesa-Plata, O., & Cartea-González, M. E. (2021). Quantification and in vitro bioaccessibility of glucosinolates and trace elements in Brassicaceae leafy vegetables. *Food Chemistry*, 339, 127860. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127860>
- Cammarano, D., Taylor, M. A., Thompson, J. A., Wright, G., Faichney, A., Haacker, R., Orr, A., & White, P. J. (2020). Predicting dates of head initiation and yields of broccoli crops grown throughout Scotland. *European Journal Of Agronomy*, 116, 126055. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126055>
- Campos, M. (2024, 13 de septiembre). Mexico improves rankings as exporter of key agricultural products. Blue Book Services. <https://www.bluebookservices.com/mexico-improves-rankings-as-exporter-of-key-agricultural-products/>
- Chen, M., Schievano, A., Bosco, S., Montero-Castaño, A., Tamburini, G., Perez-Soba, M., & Makowski, D. (2023). Evidence map of the benefits of enhanced-efficiency fertilisers for the environment, nutrient use efficiency, soil fertility, and crop production. *Environmental Research Letters*, 18(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acb833>
- Chen, Z., Wang, L., Cardoso, J. A., Zhu, S., Liu, G., Rao, I. M., & Lin, Y. (2023). *Improving phosphorus acquisition efficiency through modification of root growth responses to*

phosphate starvation in legumes. Frontiers in Plant Science, 14, 1094157.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1094157>

Cherlinka, V. (2024, 12 de septiembre). Fertilizantes fosfatados: tipos e impacto en las plantas. EOS Data Analytics. <https://eos.com/es/blog/fertilizantes-fosfatados/>

Chtouki, M., Naciri, R., & Oukarroum, A. (2024). A review on phosphorus drip fertigation in the Mediterranean region: Fundamentals, current situation, challenges, and perspectives. *Heliyon*, 10(3), e25543. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25543>

Cisneros Reyes, Y. D., & Rocha Ibarra, J. E. (2019). La producción de brócoli en la actividad agroindustrial en México y su competitividad en el mercado internacional. *Acta Universitaria*, 29, e2156. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2156>

Cuesta, R. L. C., Mattiello, E. M., Castro, G. F., Matias, P. C., Monteiro, T. S. A., & Freitas, L. G. (2024) Efficiency of phosphate fertilizers containing growth promoters in plant fertilization. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 56, 103019. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103019>

Cuesta, R. L. C., Mattiello, E. M., De Castro, G. F., Matias, P. C., Monteiro, T. S. A., & De Freitas, L. G. (2024). Efficiency of phosphate fertilizers containing growth promoters in plant fertilization. *Biocatalysis And Agricultural Biotechnology*, 56, 103019. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103019>

Dhukuchhu, A., Kaya, O., & Hatterman-Valenti, H. (2025). Planting date and cultivar selection effects on cauliflower growth, physiology, and yield performance in North Dakota growing conditions. *Horticulturae*, 11(11), 1314. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11111314>

Di Tomassi, I., Chatterjee, N., Barrios-Masias, F. H., Zhou, Q., Gu, C., & Margenot, A. J. (2021). *Arbuscular mycorrhizae increase biomass and nutrient uptake of tomato fertilized with struvite compared to monoammonium phosphate. Plant and Soil*, 464, 321–333. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04957-2>

Diacono, M., & Montemurro, F. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 401–422. <https://doi.org/10.1051/agro/2009040>

- Drabińska, N., Jež, M., & Nogueira, M. (2021). Variation in the accumulation of phytochemicals and their bioactive properties among the aerial parts of cauliflower. *Antioxidants*, 10(10), 1597. <https://doi.org/10.3390/antiox10101597>
- Dzul-Caamal, R., Vega-López, A., & Rendón-von Osten, J. (2020). Distribution of heavy metals in crop soils from an agricultural region of the Yucatan Peninsula and biochemical changes in earthworm *Eisenia foetida* exposed experimentally. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(6), 338. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08273-7>
- Eugui, D., Millán, A. F., Velasco, P., Veramendi, J., Rodríguez, V. M., & Poveda, J. (2025). Broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) biomass as a resource for obtaining glucosinolate extracts to control postharvest fungal diseases. *Journal Of Plant Diseases And Protection*, 132(3). <https://doi.org/10.1007/s41348-025-01099-w>
- Eugui, D., Millán, A. F., Velasco, P., Veramendi, J., Rodríguez, V. M., & Poveda, J. (2025b). Broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) biomass as a resource for obtaining glucosinolate extracts to control postharvest fungal diseases. *Journal Of Plant Diseases And Protection*, 132(3). <https://doi.org/10.1007/s41348-025-01099-w>
- Fan, X., Zhou, X., Chen, H., Tang, M., & Xie, X. (2021). Cross-Talks Between Macro- and Micronutrient Uptake and Signaling in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 663477. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.663477>
- Fang, X., Yang, D., Deng, L., Zhang, Y., Lin, Z., Zhou, J., Chen, Z., Ma, X., Guo, M., Lu, Z., & Ma, L. (2024). Phosphorus uptake, transport, and signaling in woody and model plants. *Forestry Research*, 4, e017. <https://doi.org/10.48130/forres-0024-0014>
- Fang, X., Yang, D., Deng, L., Zhang, Y., Lin, Z., Zhou, J., Chen, Z., Ma, X., Guo, M., Lu, Z., & Ma, L. (2024). *Phosphorus uptake, transport, and signaling in woody and model plants*. **Forestry Research**, 4, e017. <https://doi.org/10.48130/forres-0024-0014>
- Fathi, A., & Mehdiniya Afra, J. (2023). Plant growth and development in relation to phosphorus: A review. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture*, 80(1), 1–7. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-agr:2022.0012>
- Fertinova Agroproductos. (s. f.). Ficha técnica: MAP 11-52-00 (fosfato monoamónico). <https://www.fertinova.mx/sites/default/files/FICHA%20MAP.pdf>

- Fertinova. (s. f.). Fosfato monoamónico (MAP 11-52-00): ficha técnica. <https://www.fertinova.mx/sites/default/files/FICHA%20MAP.pdf>
- Fornaris Rullán, G. J. (2014). Características de la planta. En Conjunto tecnológico para la producción de repollo. Estación Experimental Agrícola, Colegio de Ciencias Agrícolas, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez. <https://www.uprm.edu/eea/wp-content/uploads/sites/177/2016/04/2.-REPOLLO-CARACTERI%CC%81STICAS-DE-LA-PLANTA-v.-2014.pdf>
- Frattini, N., Pulido Carrasquero, A., Pronsato, L., Milanese, L., & Vasconsuelo, A. (2023). Effects of common fertilizers on the soil ecosystem. Bulletin of the National Research Centre, 47(1), 78. <https://doi.org/10.1186/s42269-023-01051-8>
- FreshPlaza. (2022, 27 de abril). Mexico is the world's second biggest exporter of broccoli and cauliflower. <https://www.freshplaza.com/north-america/article/9422152/mexico-is-the-world-s-second-biggest-exporter-of-broccoli-and-cauliflower/>
- Gómez-Merino, F. C., & Trejo-Téllez, L. I. (2015). Biostimulant activity of phosphite in horticulture. Scientia Horticulturae, 196, 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.035>
- Gong, H., Xiang, Y., Wu, J., Luo, L., Chen, X., Jiao, X., & Chen, C. (2024). Integrating phosphorus management and cropping technology for sustainable maize production. Journal of Integrative Agriculture, 23(4), 1369–1380. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2023.10.018>
- Gonzales, M. R. (2015). Efecto de cinco dosis de humus de lombriz en el cultivo de repollo (Brassica oleracea L.) var. corazón de buey, en la zona del Alto Huallaga – Tocache [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio Institucional UNSM. <https://repositorio.unsm.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/1d1e1906-68f1-422d-8b83-48532116f93c/content>
- Gram, G., Roobroeck, D., Pypers, P., Six, J., Merckx, R., & Vanlauwe, B. (2020). Combining organic and mineral fertilizers as a climate-smart integrated soil fertility management practice in sub-Saharan Africa: A meta-analysis. PLOS ONE, 15(9), e0239552. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239552>

- Guelfi, D., Nunes, A. P. P., Sarkis, L. F., et al. (2022). *Innovative phosphate fertilizer technologies to improve phosphorus use efficiency in agriculture*. *Sustainability*, 14(21), 14266. <https://doi.org/10.3390/su142114266>
- Guo, D. P., Shah, G. A., Zeng, G. W., & Zheng, S. J. (2004). The interaction of plant growth regulators and vernalization on the growth and flowering of cauliflower (*Brassica oleracea* var. botrytis). *Plant Growth Regulation*, 43(2), 163–171. <https://doi.org/10.1023/B:GROW.0000040114.84122.11>
- Hashmi, Z. U. H., Khan, M. J., Akhtar, M., Sarwar, T., & Khan, M. J. (2017). Enhancing phosphorus uptake and yield of wheat with phosphoric acid application in calcareous soil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(6), 1733–1739. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7921>
- Hawkesford, M. J., Cakmak, I., Coskun, D., De Kok, L. J., Lambers, H., Schjoerring, J. K., & White, P. J. (2023). Functions of macronutrients. En Z. Rengel, I. Cakmak, & P. J. White (Eds.), *Marschner's mineral nutrition of plants* (4.^a ed., pp. 201–281). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00019-8>
- Helgi Library. (2024). Production of cauliflower and broccoli in the world. <https://www.helgilibrary.com/indicators/production-of-cauliflower-and-broccoli/world/>
- Hermann, L., Kraus, F., & Hermann, R. (2018). Phosphorus processing—potentials for higher efficiency. *Sustainability*, 10(5), 1482. <https://doi.org/10.3390/su10051482>
- Hernandez, L. E., Ruiz, J. M., Espinosa, F., Alvarez-Fernandez, A., & Carvajal, M. (2024). Plant nutrition challenges for a sustainable agriculture of the future. *Physiologia Plantarum*, 176(6), e70018. <https://doi.org/10.1111/ppl.70018>
- Hernandez, T., Berlanga, J. G., Tormos, I., & Garcia, C. (2021). Organic versus inorganic fertilizers: Response of soil properties and crop yield. *AIMS Geosciences*, 7(3), 415–439. <https://doi.org/10.3934/geosci.2021024>
- Infoagro, & Infoagro. (2021, 19 agosto). Guía técnica del cultivo de repollo o col. InfoAgronomo. <https://infoagronomo.net/guia-tecnica-del-cultivo-de-repollo-o-col/>
- Ishfaq, M., Wang, Y., Xu, J., Hassan, M. U., Yuan, H., Liu, L., He, B., Ejaz, I., White, P. J., Cakmak, I., Chen, W.-S., Wu, J., van der Werf, W., Li, C., Zhang, F., & Li, X. (2023). Improvement of nutritional quality of food crops with fertilizer: A global meta-analysis.

Agronomy for Sustainable Development, 43(6), 74. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00923-7>

Jin, Y., Zhang, N., Chen, Y., Wang, Q., Qin, Z., Sun, Z., & Zhang, S. (2023). Quantitative Evaluation of the Crop Yield, Soil-Available Phosphorus, and Total Phosphorus Leaching Caused by Phosphorus Fertilization: A Meta-Analysis. *Agronomy*, 13(9), 2436. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092436>

Jindo, K., Audette, Y., Lopez Olivares, F., Canellas, L. P., Smith, D. S., & Voroney, R. P. (2023). Biotic and abiotic effects of soil organic matter on the phytoavailable phosphorus in soils: A review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10, 29. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00401-y>

Kapusta-Duch, J., Kuszniereicz, B., Leszczyńska, T., & Borczak, B. (2016). Effect of cooking on the contents of glucosinolates and their degradation products in selected Brassica vegetables. *Journal Of Functional Foods*, 23, 412-422. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.03.006>

Khan, F., Siddique, A. B., Shabala, S., Zhou, M., & Zhao, C. (2023). Phosphorus plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses. *Plants*, 12(15), 2861. <https://doi.org/10.3390/plants12152861>

Khan, S., Rahman, H., Ali, M., & Ahmad, I. (2023). Chemical fertilizer and its effects on the soil environment. *Journal of Environmental and Agricultural Sciences*, 31, 45–58. https://www.researchgate.net/publication/372626886_Chemical_Fertilizer_and_its_Effects_on_the_Soil_Environment

Kiani, M., & Ylivainio, K. (2024). Methods for testing short- and long-term phosphorus fertilizing efficiency of products with varying solubility. *Science of the Total Environment*, 922, 170965. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170965>

Kirkby, E. A. (2023). Introduction, definition, and classification of nutrients. In Elsevier eBooks (pp. 3-9). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819773-8.00016-2>

Kumar, S., Kumar, S., & Mohapatra, T. (2021). Interaction between macro- and micro-nutrients in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 665583. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.665583>

- Kumar, S., Kumar, S., & Mohapatra, T. (2021). Interaction Between Macro- and Micro-Nutrients in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 665583. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.665583>
- Kumar, S., Meena, M. L., Yadav, G. L., & Meena, R. K. (2019). Effect of nitrogen and spacing on growth and yield of cabbage (*Brassica oleracea* L. var. capitata). *The Pharma Innovation Journal*, 8(2S), 255–258. <https://www.phytojournal.com/archives/2019/vol8issue2S/PartX/SP-8-2-255-611.pdf>
- Lambers, H. (2022). *Phosphorus acquisition and utilization in plants*. *Annual Review of Plant Biology*, 73, 17–42. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102720-125738>
- Li, R., Hou, Z., Gao, L., Xiao, D., Hou, X., Zhang, C., Yan, J., & Song, L. (2024). Cabbage development in time: How differential parenchyma tissue growth affects leafy head formation. *Plants*, 13(5), 656. <https://doi.org/10.3390/plants13050656>
- Li, Z., Kong, X., Zhang, Z., Tang, F., Wang, M., Zhao, Y., & Shi, F. (2025). The functional mechanisms of phosphite and its applications in crop plants. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1538596. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1538596>
- Li, Z., Kong, X., Zhang, Z., Tang, F., Wang, M., Zhao, Y., & Shi, F. (2025). *The functional mechanisms of phosphite and its applications in crop plants*. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1538596>
- Lindemann-Zutz, K., Fricke, A., & Stützel, H. (2015). Prediction of time to harvest and its variability in broccoli (*Brassica oleracea* var. italica) Part I. Plant developmental variation and forecast of time to head induction. *Scientia Horticulturae*, 198, 424-433. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.023>
- Lino, A. C. M., Buzetti, S., Teixeira Filho, M. C. M., Galindo, F. S., Colombo, A. S., & Dupas, E. (2018). Effect of phosphorus applied as monoammonium phosphate-coated polymers in corn culture under no-tillage system. *Semina: Ciências Agrárias*, 39(1), 99–112. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2018v39n1p99>
- Lizcano-Toledo, R., Reyes Martín, M. P., Celi, L., & Fernández Ondoño, E. (2021). Phosphorus dynamics in the soil–plant–environment relationship in cropping systems: A review. *Applied Sciences*, 11(23), 11133. <https://doi.org/10.3390/app112311133>

Maaz, T. M., Dobermann, A., Lyons, S. E., & Thomson, A. M. (2025). Review of research and innovation on novel fertilizers for crop nutrition. *npj Sustainable Agriculture*, 3(1), 25. <https://doi.org/10.1038/s44264-025-00066-0>

Maaz, TM, Dobermann, A., Lyons, SE et al. Revisión de la investigación e innovación sobre fertilizantes novedosos para la nutrición de cultivos. *npj Sustain. Agric.* 3 , 25 (2025). <https://doi.org/10.1038/s44264-025-00066-0>

Manríquez Zúñiga, A. N., Rosillo de la Torre, A., Valdés Santiago, L., Hernández Bustos, D. A., Cuéllar Sojo, S., Hernández Rayas, A., Pérez Vega, S., & Molina Guerrero, C. E. (2023). Broccoli leaves (*Brassica oleracea* var. *italica*) as a source of bioactive compounds and chemical building blocks: Optimal extraction using dynamic maceration and life cycle assessment. *Sustainability*, 15(24), 16616. <https://doi.org/10.3390/su152416616>

Martínez Cerino, I. del R., Córdova Bautista, Y., Álvarez Ramírez, J. G., López Rodríguez, A. S., & Martínez Pereyra, G. (2025). Medio alternativo con melaza y urea como fuente de nutrientes para el cultivo de biomasa fúngica fosfatosolubilizadora. *Revista Veritas de Difusão Científica*, 6(1), 2957–2973. <https://doi.org/10.61616/rvdc.v6i1.556>

Maticic, M., Dugan, I., & Bogunovic, I. (2024). Challenges in sustainable agriculture—The role of organic amendments. *Agriculture*, 14(4), 643. <https://doi.org/10.3390/agriculture14040643>

Matschegewski, C., Zetzsche, H., Hasan, Y., Leibeguth, L., Briggs, W., Ordon, F., & Uptmoor, R. (2015). Genetic variation of temperature-regulated curd induction in cauliflower: Elucidation of floral transition by genome-wide association mapping and gene expression analysis. *Frontiers in Plant Science*, 6, 720. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00720>

McLachlan, J. W., English, P. W., Flavel, R. J., & Guppy, C. N. (2024). *Availability of phosphorus and nitrogen from modified mono-ammonium phosphate (MAP) fertiliser compounds*. *Soil Research*, 62(5), Article SR24010. <https://doi.org/10.1071/SR24010>

Mohamed, M. H. M., Ali, M., Eid, R. S. M., El-Desouky, H. S., Petropoulos, S. A., Sami, R., Al-Mushhin, A. A., & Zewail, R. M. Y. (2021). Phosphorus and biofertilizer

- application effects on growth parameters, yield and chemical constituents of broccoli. *Agronomy*, 11(11), 2210. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112210>
- Mohamed, MHM; Ali, M.; Eid, RSM; El-Desouky, HS; Petropoulos, SA; Sami, R.; Al-Mushhin, AAM; Ismail, KA; Zewail, RMY. Efectos de la aplicación de fósforo y biofertilizantes en los parámetros de crecimiento, el rendimiento y los componentes químicos del brócoli. *Agronomy* **2021** , 11 , 2210. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112210>
- Mohammad, M. J., Hammouri, A., & Ferdows, A. E. (2004). Phosphorus fertigation and preplant conventional soil application of drip irrigated summer squash. *Journal of Agronomy*, 3(3), 162–169. <https://doi.org/10.3923/ja.2004.162.169>
- Morales-Morales, E. J., Martínez-Campos, A. R., López-Sandoval, J. A., Castillo-González, A. M., & Rubí-Arriaga, M. (2022). Los fosfitos y sus aplicaciones en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(2), 345–354. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/2906>
- Nagraj, G. S., Chouksey, A., Jaiswal, S., & Jaiswal, A. K. (2020). Broccoli. En Elsevier eBooks (pp. 5-17). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812780-3.00001-5>
- Nunes, A. P. P., Santos, C. F., & Guelfi, D. (2022). Interfaces between biodegradable organic matrices coating and MAP fertilizer for improve use efficiency. *Science of the Total Environment*, 804, 149896. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149896>
- Nutrien Economics. (2025). Monoammonium phosphate (MAP). <https://nutrien-economics.com/wp-content/uploads/2025/01/5-NSS-09-Monoammonium-Phosphate.pdf>
- Odoom, A., & Ofori, W. (2024). *Role of phosphorus in the photosynthetic dark phase biochemical pathways*. En *Phosphorus in soils and plants*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.112573>
- ouza, F. M., De Oliveira, S. L., Moretti, L. G., Viveiros, J., Rodrigues, V. A., Portugal, J. R., Bossolani, J. W., Ferrari, M. B., Pavinato, P. S., & Crusciol, C. A. C. (2025). Optimizing foliar nutrient timing: Soluble monoammonium phosphate applications improve maize physiological parameters and productivity under water stress. *Agronomy Journal*, 117(6). <https://doi.org/10.1002/agj2.70234>

- Picchi, V., Fibiani, M., & Lo Scalzo, R. (2020). Cauliflower. En Elsevier eBooks (pp. 19-32).
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812780-3.00002-7>
- Pino, M. del. (2016). El cultivo del brócoli. Contacto Rural, (3), 12–13. Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/69028>
- Producción de Repollo por Países en el Mundo: Estadísticas 2023. (s. f.).
<https://mx.atlasbig.com/paises-por-produccion-de-repollo>
- Quizhpe, J., Ayuso, P., Rosell, M. de los Ángeles, Peñalver, R., & Nieto, G. (2024). Brassica oleracea var. italica and their by products as source of bioactive compounds and food applications in bakery products. Foods, 13(21), 3513.
<https://doi.org/10.3390/foods13213513>
- Ranjous, M., Al-Balkhi, A., Al-Khader, A., Jaafar, A. A. K., & Rodríguez-Seijo, A. (2025). Integrated Nutrient Management Enhances the Growth and Yield of Cauliflower (Brassica oleracea var. botrytis) in Calcareous Soil: A Field Experiment with Mineral, Organic, and Biofertilizers. ACS Omega, 10(51), 63093-63101.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.5c09287>
- Rodrigues, V. A., Moretti, L. G., Alves Filho, I., Pacola, M., Viveiros, J., Jacomassi, L. M., Oliveira, S. L., Amine, J., Galeriani, T. M., Campos, M., Portugal, J. R., Bossolani, J. W., & Crusciol, C. A. C. (2025). Enhancing soybean physiology and productivity through foliar application of soluble monoammonium phosphate. Agronomy, 15(4), 818. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040818>
- Rodríguez, V. M., Soengas, P., Alonso-Villaverde, V., Sotelo, T., Cartea, M. E., & Velasco, P. (2015). Effect of temperature stress on the early vegetative development of *Brassica oleracea* L. BMC Plant Biology, 15(1), 145. <https://doi.org/10.1186/s12870-015-0535-0>
- Rurek, M., Woyda-Ploszczyca, A. M., & Jarmuszkiewicz, W. (2015). Biogenesis of mitochondria in cauliflower (Brassica oleracea var. botrytis) curds subjected to temperature stress and recovery involves regulation of the complexome, respiratory chain activity, organellar translation and ultrastructure. Biochimica Et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics, 1847(4-5), 399-417.
<https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2015.01.005>

- Sammartino, S., Pizzeghello, D., Francioso, O., & Nardi, S. (2019). Short-term application of polymer-coated mono-ammonium phosphate in a calcareous soil affects the pools of available phosphorus and plant growth. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00004>
- Sánchez, E. (2024, 25 de septiembre). El colosal desperdicio del campo: El 70% de los fertilizantes acaban en el aire, acuíferos y aguas superficiales. *El País*. <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2024-09-25/el-colosal-desperdicio-del-campo-el-70-de-los-fertilizantes-acaban-en-el-aire-acuiferos-y-aguas-superficiales.htm> |
- Sánchez, E. (2024, 25 de septiembre). El colosal desperdicio del campo: el 70% de los fertilizantes acaban en el aire, acuíferos y aguas superficiales. *El País*. <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2024-09-25/el-colosal-desperdicio-del-campo-el-70-de-los-fertilizantes-acaban-en-el-aire-acuiferos-y-aguas-superficiales.html>
- Santos, W. O., Mattiello, E. M., Barreto, M. S. C., & Cantarutti, R. B. (2019). Acid ammonium citrate as P extractor for fertilizers of varying solubility. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 43, e0180072. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20180072>
- Savita, J., Choudhary, A. K., Singh, N. M., & Kumar, A. (2014). Scientific cultivation of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis). En A. K. Choudhary, K. S. Rana, A. Dass & M. Srivastav (Eds.), *Advances in vegetable agronomy* (pp. 67–78). Post Graduate School, Indian Agricultural Research Institute; Indian Council of Agricultural Research. https://www.researchgate.net/publication/330564347_Scientific_Cultivation_of_Cauliflower_Brassica_oleracea_L_var_botrytis
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (s. f.). Coliflor: hortaliza saludable y nutritiva. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/coliflor-hortaliza-saludable-y-nutritiva>
- Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Recursos Hidráulicos. (s. f.). Coliflor. Sistema Estatal de Información Agropecuaria (SEIA). <https://www.sedarh.gob.mx/seia/cultivos/coliflor>

- Secretaría de Economía. (s. f.). Coles, incluyendo repollo y coliflor: productos alimenticios de brassicas frescos o refrigerados. Data México. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/product/coles-including-cabbage-cauliflower-and-gender-related-products-food-brassicas-fresh-or-chilled>
- Shahzad, M., Hayat, R., Mujtaba, G., Rehman, W. U., & Nadeem, M. (2025). Biofertilizers in sustainable agriculture: Mechanisms, applications, and future prospects. *Discover Agriculture*, 3, Article 224. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00318-0>
- Shi, T., Collins, S. L., Yu, K., Peñuelas, J., Sardans, J., Li, H., & Ye, J. (2024). A global meta-analysis on the effects of organic and inorganic fertilization on grasslands and croplands. *Nature Communications*, 15(1), 3411. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47829-w>
- Simonne, E., Zhang, S., Liu, G., Li, Y., & Datnoff, L. (2024, 7 marzo). Are Phosphorous and Phosphoric Acids Equal Phosphorous Sources for Plant Growth? Ask IFAS - Powered By EDIS. <https://ask.ifas.ufl.edu/publication/HS254>
- Sinha, D., & Tandon, P. K. (2020). An overview of nitrogen, phosphorus and potassium: Key players of nutrition process in plants. En K. Mishra, D. K. Shukla, & S. Kumar (Eds.), *Sustainable solutions for elemental deficiency and excess in crop plants* (pp. 85–117). Springer. https://www.researchgate.net/publication/346641573_An_Overview_of_Nitrogen_P_hosphorus_and_Potassium_Key_Players_of_Nutrition_Process_in_Plants
- Siomos, A. S., Koularmanis, K., & Tsouvaltzis, P. (2022). The Impacts of the Emerging Climate Change on Broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica* Plenck.) *Crop. Horticulturae*, 8(11), 1032. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8111032>
- Siomos, A. S., Koularmanis, K., & Tsouvaltzis, P. (2022). The impacts of the emerging climate change on broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica* Plenck.) *crop. Horticulturae*, 8(11), 1032. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8111032>
- Tagkas, C. F., Rizos, E. C., Markozannes, G., Karalexi, M. A., Wairegi, L., & Ntzani, E. E. (2024). Fertilizers and human health—A systematic review of the epidemiological evidence. *Toxics*, 12(10), 694. <https://doi.org/10.3390/toxics12100694>
- Tapia Torres, Y., & García Oliva, F. (2013). La disponibilidad del fósforo es producto de la actividad bacteriana en el suelo en ecosistemas oligotróficos: una revisión crítica.

Terra Latinoamericana, 31(3), 231–242. Recuperado de <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v31n3/2395-8030-tl-31-03-00231.pdf>

Tariq, A., & Ahmed, A. (2024). *Phosphate solubilization potential of PSB*. Environmental Science and Pollution Research. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34934-y>

Torres Fernández V. C. (2024). Respuesta en el Crecimiento y Contenido de Compuestos Bioactivos en Brotes de Repollo (*Brassica Oleracea* L. var. Capitata) a distintos Elicitores. Memoria Presentada para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Repositorio Institucional, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Concepción, Chile. Disponible en: <https://repositorio.udec.cl/server/api/core/bitstreams/aa818974-8841-483c-9a09-8eb2eedaf903/content>

Trejo-Téllez, L. I., Carbajal-Vázquez, V. H., Lavín-Castañeda, J., & Gómez-Merino, F. C. (2024). Phosphite as a sustainable and versatile alternative for biostimulation, biocontrol, and weed management in modern agriculture. *Processes*, 12(12), 2764. <https://doi.org/10.3390/pr12122764>

Trejo-Téllez, L. I., Carbajal-Vázquez, V. H., Lavín-Castañeda, J., & Gómez-Merino, F. C. (2024). *Phosphite as a sustainable and versatile alternative for biostimulation, biocontrol, and weed management in modern agriculture*. *Processes*. <https://doi.org/10.3390/pr12122764>

Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, S., Mishra, S., Chauhan, D. K., Dubey, N. K., & colaboradores. (2015). Micronutrients and their diverse role in agricultural crops: Advances and future prospective. *Acta Physiologiae Plantarum*, 37, 139. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1870-3>

Ul Islam, M., Jiang, F., Islam, M. M., Ibrahim, M. M., Halder, M., Liu, Y., & Hou, E. (2026). Organic amendment quality as a driver of soil phosphorus enrichment and crop yield: A global synthesis. *Soil and Tillage Research*, 256, Article 106836. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106836>

Vista de Rendimiento Rendimiento agronómico del jitomate suplementado con microelementos Fe, Cu y Zn. (s. f.). <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/1822/2539>

- Viveiros, J., Moretti, L. G., Alves Filho, I., Pacola, M., Jacomassi, L. M., Rodrigues, V. A., Jamal, A., Bossolani, J. W., Portugal, J. R., Carbonari, C. A., & Crusciol, C. A. C. (2025). *Can foliar application of soluble monoammonium phosphate effectively alleviate herbicide-induced oxidative stress in key crops?* **Frontiers in Plant Science**, **16**, 1504244. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1504244>
- Wang, Y., Wang, F., Lu, H., Liu, Y., & Mao, C. (2021). Phosphate uptake and transport in plants: An elaborate regulatory system. *Plant and Cell Physiology*, *62*(4), 564–572. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcab011>
- Wdowiak, A., Podgórska, A. y Szal, B. El calcio en las plantas: un elemento importante de la fisiología y estructura celular, la señalización y las respuestas al estrés. *Acta Physiol Plant* *46* , 108 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11738-024-03733-w>
- Wu, F., Chen, D., Niu, Q., & Xiao, X. (2025). Current status of phosphoric acid preparation technology and future application directions of microbial methods. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *43*, 101882. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101882>
- Wu, F., Chen, D., Niu, Q., & Xuan, X. (2025). *Current status of phosphoric acid preparation technology and future application directions of microbial methods*. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, **43**, 101882. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101882>
- Xu, D., Zhong, B., Wang, X., Li, X., Zhong, Y., Yan, Z., Yang, J., Li, X., Wang, Y., & Zhou, X. (2022). The development road of ammonium phosphate fertilizer in China. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, *41*, 170–175. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2021.08.015>
- Yahaya, S. M., Mahmud, A. A., Abdullahi, M., & Haruna, A. (2022). Recent advances in the chemistry of nitrogen, phosphorus and potassium as fertilizers in soil: A review. *Pedosphere*, *33*(3), 385-406. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.07.012>
- Yang, X., Liu, C., Liang, C., Wang, T., & Tian, J. (2024). *The phosphorus–iron nexus: Decoding the nutrients interaction in soil and plant*. *International Journal of Molecular Sciences*, *25*(13), 6992. <https://doi.org/10.3390/ijms25136992>
- Yáñez-Juárez, M. G., López-Orona, C. A., Ayala-Tafoya, F., Partida-Ruvalcaba, L., Velázquez-Alcaraz, T. de J., & Medina-López, R. (2018). Los fosfitos como

alternativa para el manejo de problemas fitopatológicos. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 36(1), 79–94. <https://www.redalyc.org/journal/612/61258143005/>

Yingfu de Yunnan. (2025, 16 de agosto). Fosfato monoamónico: fertilizante de alta pureza para cultivos más productivos y sostenibles | Guía técnica. Yunnan Yingfu Fertilizer. <https://www.ynfertilizer.com/es/news/monoammonium-phosphate-map-high-purity-easily-absorbed-fertilizer-driving-global-agricultural-sustainability.html>

Yu, Q., Hagedorn, F., Penuelas, J., Sardans, J., Tan, X., Yan, Z., He, C., Ni, X., Feng, Y., Zhu, J., Ji, C., Tang, Z., Li, M., & Fang, J. (2024). Differential Responses of Soil Phosphorus Fractions to Nitrogen and Phosphorus Fertilization: A Global Meta-Analysis. *Global Biogeochemical Cycles*, 38(7). <https://doi.org/10.1029/2023gb008064>

Zewide, I., & W., M. (2021). Review on macronutrient in agronomy crops. *Journal of Nutrition and Food Processing*, 4(6). <https://doi.org/10.31579/2637-8914/062>

Zhang, K., Wan, X., Li, C., Xia, X., Lou, Y., Bai, B., & Hu, H. (2025). The effects of the combined application of organic and inorganic fertilizers on the annual balance of nitrogen and phosphorus in farmlands. *Scientific Reports*. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-19459-9>

Zhang, Y. L., Xiao, R., Zhao, Y. C., Li, T., Cheng, H. Y., & Zhang, H. J. (2025). Impact of phosphorus reduction combined with biofertilizer application on soil nutrients and microbial communities in arid oasis agricultural areas. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1606813. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1606813>

Zhang, Y., et al. (2024). *Comprehensive insights into phosphorus solubility and organic matter interactions*. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69399-z>

Zhou, Q., Tang, J., Liu, C., Huang, K., & Huang, X. (2023). Effects of phosphate fertilizer application on the growth and yield of Tartary buckwheat under low-nitrogen condition. *Agronomy*, 13(7), 1886. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071886>

Zhu, Y., Xing, Y., Li, Y., Jia, J., Ying, Y., & Shi, W. (2024). The role of phosphate solubilizing microbial interactions in phosphorus activation and utilization in plant–soil systems: A review. *Plants*, 13(19), 2686. <https://doi.org/10.3390/plants13192686>

Zúñiga-Estrada, L., De Jesús Martínez-Hernández, J., De los Ángeles Sariñana-Navarrete, M., Buendía-García, A., Zuñiga-Valenzuela, R., Zapata-Sifuentes, G., & Preciado-Rangel, P. (2025). Adsorción y Disponibilidad de Fósforo de Dos Fuentes

Fosfatadas en un Vertisol del Norte de México.

<https://agris.fao.org/search/es/records/6878ec5b5d9ad5f58d6085cd>