

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



DINÁMICA DE LA LIBERACIÓN DE NUTRIENTES DE FERTILIZANTES BASE
EN EL CULTIVO DE JITOMATE

Tesis

Que presenta IVÁN GÓMEZ CARMONA
como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

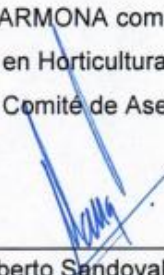
Saltillo, Coahuila

Abril 2025


DINÁMICA DE LA LIBERACIÓN DE NUTRIENTES DE FERTILIZANTES BASE
EN EL CULTIVO DE JITOMATE

Tesis


Elaborado por IVÁN GÓMEZ CARMONA como requisito parcial para obtener el
grado de Maestro en Ciencias en Horticultura con la supervisión y aprobación
del Comité de Asesoría



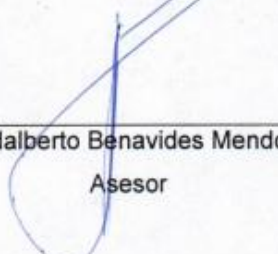
Dr. Alberto Sandoval Rangel
Director de Tesis




Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Asesor




Dr. Neymar Camposeco Montejó
Asesor



Dr. Adalberto Benavides Mendoza
Asesor



Dr. Felicitó Ausencio Díaz Vázquez
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado
UAAAN

Saltillo, Coahuila

Abril 2025

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Virgen de Guadalupe, por haberme permitido llegar hasta este punto de mi vida y haberme otorgado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad, amor y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de mi formación profesional.

Quiero agradecer con mucho cariño, respeto y admiración a mis padres; **Margarito Gómez Palafox y Erika Carmona Hernández**, quienes, con su apoyo incondicional, dedicación y esfuerzo me han motivado para cumplir una de mis metas, sus consejos, educación y enseñanzas son sin duda el mejor legado que hayan podido compartirme. Gracias por ser los principales promotores de mis metas, creer en mí y en mis expectativas, siendo para mí el mejor regalo que pudieron haberme dado, dedicaron una vida entera trabajando para darme un mejor futuro. Este nuevo logro es para ustedes, ahora me toca a mí responder y cumplir todas mis metas, los quiero mucho.

También quiero agradecer a mis hermanos **Oswaldo Gómez Carmona y María José Gómez Carmona** por el cariño, apoyo y consejos que siempre me han brindado, espero poder ser ejemplo de esfuerzo y dedicación para ustedes.

Quiero agradecer a **mi familia**, por su cariño, apoyo y que siempre estuvieron ahí para motivarme y alentarme a que termine la carrera, además de sus valiosos consejos y sabiduría. Gracias.

A mi **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por haberme recibido y permitido formarme profesionalmente, dándome innumerables e incomparables oportunidades dentro y fuera de las aulas, así como también a mis diferentes maestros que me brindaron sus conocimientos, los cuales me permitirán honrar y defender la calidad de tan noble institución educativa.

Al **Dr. Alberto Sandoval Rangel**, por compartir su conocimiento, experiencia y afecto, mismos que permitieron el logro de todos los trabajos realizados durante el proyecto. Gracias por haberme dado la oportunidad de realizar actividades extracurriculares, por la humildad y por la calidez humana que siempre demuestra en su actividad profesional.

Al **Dr. Felicito Ausencio Díaz Vázquez**, por compartir de su conocimiento y experiencias, además de brindarme su amistad y paciencia en todo momento desde el inicio hasta la conclusión de este proyecto ya que siempre me brindó su apoyo, además de los conocimientos, sugerencias y puntos de vista en la elaboración de la investigación.

Al **Dr. Neymar Camposeco Montejo**, por compartir su conocimiento y experiencias, además de su paciencia en todo momento desde el inicio hasta la conclusión de este proyecto ya que siempre me dio su apoyo con relación a los conocimientos, experiencias, sugerencias y puntos de vista en la elaboración de del proyecto.

Al **Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente**, por compartir su conocimiento y experiencias, además de su paciencia en todo momento desde el inicio hasta la conclusión del posgrado, ya que siempre me dio su apoyo con relación a los conocimientos, experiencias, sugerencias y puntos de vista en la elaboración de del proyecto.

Al **Dr. Adalberto Benavides Mendoza**, por compartir su conocimiento y experiencias, además de su paciencia en todo momento desde el inicio hasta la conclusión del posgrado, ya que siempre me dio su apoyo con relación a los conocimientos, experiencias, sugerencias y puntos de vista en la elaboración de del proyecto.

DEDICATORIA

A Dios y la virgen de Guadalupe por bendecirnos con el maravilloso regalo de la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

A mis padres **Margarito Gómez Palafox y Erika Carmona Hernández**, que gracias a sus consejos, sacrificios y cariño pude cumplir una de mis metas, por inculcarme desde la infancia los valores necesarios para ser un ciudadano de bien.

A mis hermanos **Oswaldo y María José** por los buenos y malos momentos vividos desde nuestros primeros años de vida, por siempre estar conmigo en todo momento y darme buenos consejos.

A mis abuelos **Odilón Gómez Rojas y Gaudencia Palafox Carmona**, gracias por todos los consejos, el apoyo incondicional y la motivación para terminar mi posgrado. Sus palabras fundamentadas en la experiencia y en la sabiduría formada a través de los años son regalos invaluables, los cuales has compartido conmigo.

A mi familia que siempre estuvo conmigo es todo momento para darme ánimos para finalizar esta meta que me propuse y por sus consejos.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA	v
ÍNDICE GENERAL	vi
LISTA DE CUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Origen y clasificación taxonómica del cultivo.....	4
Producción mundial.....	4
Producción nacional.....	4
Funcionalidad del N, Ca y K en el cultivo de tomate.....	5
El suelo en la nutrición vegetal.....	6
Uso de fertilizantes en la agricultura	9
Forma de liberación.....	11
Fertilizantes de liberación lenta (FLL).....	12
Recubrimientos.....	13
MATERIALES Y MÉTODOS	19
Ubicación del experimento	19
Diseño experimental.....	19
Material Vegetal	19
Preparación y desarrollo del experimento.....	20
Mediciones de la concentración de iones en suelo	20
Medición de pH y Conductividad eléctrica	21
Variables agronómicas.....	21
Variables de calidad comercial.....	22
Variables de rendimiento	22
Análisis Estadístico	22
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23

Características del suelo.....	23
Condiciones del agua para fertirriego y solución de suelo	23
BIBLIOGRAFÍA.....	38

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Análisis de agua de riego utilizada en el cultivo.....	24
Cuadro 2. Análisis de extracto de pasta saturada del suelo en zona de estudio.	24
Cuadro 3. Prueba de comparación de medias (Tukey \geq 0.05) para la aplicación de diversos fertilizantes y dosis aplicados de fondo sobre crecimiento y productividad de tomate en invernadero.	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Representación esquemática del recubrimiento mediante (A) un recubridor de lecho fluidizado; (B) un recubridor de tambor rotativo.....	17
Figura 2. Comparación de medias para la variable de firmeza	27
Figura 3. Comparación de medias para la variable de Sólidos Solubles	28
.....	30
Figura 4. Dinámica temporal y concentración de ion nitrato por efecto de aplicación de diversas fuentes fertilizantes	30
.....	30
Figura 5. Dinámica temporal y concentración de ion nitrato por efecto de aplicación de diversas fuentes fertilizantes	30
.....	32
Figura 6. Dinámica temporal y concentración de ion calcio por efecto de aplicación de diversas fuentes fertilizantes	32
.....	32
Figura 7. Dinámica temporal y concentración de ion calcio por efecto de aplicación de diversas fuentes fertilizantes	32
Figura 8. dinámica temporal y concentración de ion potasio por efecto de aplicación de diversas fuentes fertilizantes	34
Figura 9. dinámica temporal y concentración de ion potasio por efecto de aplicación de diversas fuentes fertilizantes	34
Figura 10. dinámica temporal y concentración de conductividad eléctrica por efecto de aplicación de diversas fuentes fertilizantes	36
Figura 11. dinámica temporal y concentración de conductividad eléctrica por efecto de aplicación de diversas fuentes fertilizantes	36

RESUMEN

DINÁMICA DE LA LIBERACIÓN DE NUTRIENTES DE FERTILIZANTES BASE EN EL CULTIVO DE JITOMATE

Por

IVÁN GÓMEZ CARMONA
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ALBERTO SANDOVAL RANGEL
ASESOR

Saltillo, Coahuila

Abril 2024

Uno de los retos de la industria de fertilizante es desarrollar nuevos productos que eviten o reduzcan la contaminación ambiental a base de materiales ecológicos o con más eficiencia. Entre estos materiales se encuentran los fertilizantes de liberación lenta o controlada (FLL), los cuales permiten mejorar la eficiencia y el aprovechamiento de los nutrientes pues se encuentran disponibles durante un periodo de tiempo más largo en el suelo, debido a un recubrimiento físico o modificaciones en su estructura química que restringen su solubilidad, lo que provoca su asimilación más lenta evitando las posibles pérdidas por lixiviación y evaporación. El objetivo de esta investigación fue establecer la dinámica de liberación de iones de fertilizantes base a la solución del suelo y su efecto en el cultivo de tomate. El experimento se estableció bajo condiciones de invernadero, se trasplantó en suelo. Se evaluaron seis tratamientos compuestos de la siguiente manera: T1: Blaukorn Classic (12-8-16) a 200 kg ha^{-1} , T2: Blaukorn Classic (12-8-16) a 250 kg ha^{-1} , T3: Blaukorn Classic (12-8-16) a 300 kg ha^{-1} , T4: Triple 17 (17-17-17) a 250 kg ha^{-1} , T5: Mezcla física Keswick (48.7-10.3-10.7+16.5Mg+Mo) a 250 kg ha^{-1} y T6: Testigo sin fertilizar. Se establecieron 4 repeticiones por cada tratamiento bajo un diseño de BCA, considerando una población de 11 plantas por tratamiento. Previo al establecimiento del cultivo se realizó un análisis de suelo y agua. Una vez establecido el cultivo se evaluó la concentración de iones NO_3^- , K^+ y Ca^{+2} , pH y conductividad eléctrica de la solución del suelo. Además, se evaluaron variables de crecimiento y rendimiento y calidad del cultivo. Los datos obtenidos muestran que la concentración de los iones NO_3^- , K^+ y Ca^{+2} , presentaron fluctuaciones en función del ion evaluado, observándose una tendencia decreciente a través del tiempo y la velocidad de liberación se modificó en función de la cantidad aplicada. El pH y la conductividad eléctrica no muestran diferencia significativa durante el periodo evaluado. Respecto al crecimiento y rendimiento de la planta, no se observaron diferencias, respecto a la calidad del fruto, el tratamiento Blaukorn Classic a 250 kg ha^{-1} mostró los mejores resultados para Sólidos Solubles Totales en el fruto y el tratamiento que obtuvo mejor resultado en las variables de calidad fue el Blaukorn Classic a 300 kg ha^{-1} .

Palabras claves: Comportamiento, aporte iónico, fertilizante, solución del suelo

ABSTRACT

DYNAMICS OF NUTRIENT RELEASE FROM BASE FERTILIZERS IN TOMATO CROP

Por

IVÁN GÓMEZ CARMONA
MÁSTER IN SCIENCE IN HORTICULTURE

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ALBERTO SANDOVAL RANGEL
(ADVISER)

Saltillo, Coahuila

Abril 2024

One of the main challenges in the fertilizer industry is the development of products that minimize or reduce environmental pollution, using eco-friendly materials or more efficient formulations. Among these products, slow- or controlled-release fertilizers (SRF) have emerged as a promising option, as they improve nutrient uptake efficiency. This is because nutrients remain available in the soil for a longer period, thanks to a physical coating or modifications in the fertilizer's chemical structure that limit its solubility. As a result, nutrient release occurs more gradually, reducing losses due to leaching and evaporation.

The aim of this research was to study the ion release dynamics of fertilizers in the soil solution and their impact on tomato crop performance. The experiment was conducted under greenhouse conditions, with transplanting into soil. Six treatments were evaluated, as follows: T1: Blaukorn Classic (12-8-16) at 200 kg ha⁻¹, T2: Blaukorn Classic (12-8-16) at 250 kg ha⁻¹, T3: Blaukorn Classic (12-8-16) at 300 kg ha⁻¹, T4: Triple 17 (17-17-17) at 250 kg ha⁻¹, T5: Keswick physical blend (48.7-10.3-10.7+16.5Mg+Mo) at 250 kg ha⁻¹, and T6: Untreated control. Four replicates were established for each treatment, following a completely randomized block design (CRBD), with 11 plants per treatment. Prior to planting, soil and water analyses were conducted.

During the crop's growth, the concentration of NO₃⁻, K⁺, and Ca²⁺ ions, as well as pH and electrical conductivity of the soil solution, were evaluated. Additionally, growth, yield, and fruit quality variables were assessed. The results showed that the concentration of NO₃⁻, K⁺, and Ca²⁺ ions fluctuated depending on the specific ion, with a general decreasing trend over time. The release rate of the nutrients varied depending on the applied amount. Regarding pH and electrical conductivity, no significant differences were observed during the evaluation period. As for plant growth and yield, no significant differences were found among the treatments. However, in terms of fruit quality, the Blaukorn Classic treatment at 250 kg ha⁻¹ showed the best results for Total Soluble Solids, while the Blaukorn Classic treatment at 300 kg ha⁻¹ yielded the best results for fruit quality variables.

Index words: Dynamics, release, ions, nutrients, fertili

INTRODUCCIÓN

La fertilización de los cultivos es indispensable debido a que la productividad de estos está determinada por el manejo nutricional aportado por fuentes exógenas y la disponibilidad de nutrientes esenciales para el desarrollo de la planta en el medio de cultivo. Bajo este escenario, el sector agrícola mundial presenta problemáticas como el incremento en el precio de fertilizantes (Bárcena-Ibarra, 2022), degradación y erosión de la superficie cultivable, bajo contenido mineral del suelo y bajos rendimientos de cosecha (Zhang et al., 2020). Respecto al aporte exógeno de nutrientes, la fertilización base es una práctica agrícola que implica la aplicación de fertilizantes granulados al suelo antes de la siembra o cuando el cultivo ya está establecido, con el fin de proporcionar los nutrientes esenciales para el crecimiento óptimo de la planta (Cuevas, 2016). Estos fertilizantes están diseñados en forma de pequeños gránulos que contienen una combinación balanceada de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, junto con otros elementos como calcio, magnesio y azufre, según las necesidades específicas de los cultivos y las condiciones del suelo (Alves et al., 2003). Existe una clasificación para este tipo de fertilizantes dividiéndose en fertilizantes de liberación lenta y de liberación controlada. Ambos fertilizantes ofrecen una solución eficaz para la administración precisa y sostenible de nutrientes en los cultivos (Ma y He, 2010). Los fertilizantes de lenta liberación generalmente están formulados con recubrimientos especiales o materiales semipermeables que retardan la solubilización de los nutrientes hacia el medio de cultivo, mientras que los fertilizantes de liberación controlada utilizan tecnologías específicas para regular la velocidad y el momento de liberación de los nutrientes (Juárez-Maldonado et al., 2013), por ello es importante conocer la dinámica de los elementos que son liberados por dichos fertilizantes hacia la solución del suelo. Se denomina solución del suelo al medio en el cual los iones esenciales se mantienen disueltos y pueden ser absorbidos por el sistema radicular. De esta manera, al realizar mediciones a través del tiempo, determinando los valores de disponibilidad de ciertos iones en el suelo, se puede

establecer la “dinámica de los iones”. Lo anterior obedece a que la solución del suelo es la fase dinámica en la cual pudieran integrarse el efecto del uso de fuentes exógenas de minerales como los fertilizantes con la lixiviación y adsorción en la fase sólida del suelo y con la absorción y crecimiento de las plantas (Llenderal et al., 2019). De esta manera, la solución del suelo es un indicador de la disponibilidad de nutrientes aportados por fertilización y los liberados del sistema coloidal del suelo (Hernández-Díaz et al., 2014). Dichos fertilizantes están diseñados para liberar sus nutrientes de manera gradual, lo que permite un suministro más constante y prolongado, disminuyendo el riesgo de pérdida por lixiviación o volatilización. La efectividad de los fertilizantes de lenta liberación no solo depende de su composición química, sino también de una serie de factores ambientales que influyen en su solubilidad y disponibilidad en el suelo (Müller et al., 2018). Entre estos factores se encuentran el pH del suelo, que afecta la solubilidad de ciertos nutrientes, la temperatura, que puede acelerar la liberación de nutrientes y la humedad, que es crucial para la disolución y el transporte de los nutrientes. Además, la actividad microbiológica en el suelo juega un papel importante, ya que los microorganismos pueden influir en la descomposición de los fertilizantes y en la mineralización de nutrientes, facilitando su disponibilidad para las plantas (Fageria, 2001). Asimismo, las características físicas y químicas del suelo, como su textura, estructura y contenido de materia orgánica juegan un papel decisivo en la eficiencia de estos fertilizantes. Hay que tomar en cuenta el tipo de recubrimiento utilizado en los fertilizantes de lenta liberación ya que puede modificar las tasas de liberación, adaptándolas a las condiciones ambientales específicas. La interacción de estos fertilizantes con otros nutrientes presentes en el suelo también debe ser considerada, ya que puede influir en la disponibilidad y absorción por parte de las plantas (Barker & Pilbeam, 2007).

Con base a lo anterior, es importante conocer la concentración de los iones en la solución del suelo bajo una línea temporal cuando se emplean esquemas de nutrición basados en el aporte inicial o fertilización de fondo. La manera mayormente utilizada en campo para determinar la disponibilidad de iones es

utilizando los ionómetros con tecnología ISE (Ions Selective Electrods) ya que permite el monitoreo en tiempo real de la concentración de iones como NO_3^- , K^+ , Na^+ y Ca^{2+} , pH y CE (Kim et al., 2021). La información anterior permite hacer las correcciones necesarias antes de que se presente una deficiencia en el cultivo y aplicar ese faltante mediante fertirriego. Por lo tanto, el objetivo de la investigación fue determinar la dinámica de la liberación de los fertilizantes de lenta liberación aplicados con la técnica de fertilización de fondo utilizando como material el Blaukorn Classic Compo Expert 12-8-16(+3Mg+TE), 48.7-10.3-10.7(+16.5Mg+Mo) de la empresa Keswick y Triple 17 (17-17-17), lo anterior permitirá medir el efecto de esta dinámica en el crecimiento, variables fisiológicas y de rendimiento del cultivo de tomate de crecimiento indeterminado en condiciones de invernadero.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la dinámica de liberación de nutrientes del fertilizante (12-8-16+3Mg+TE) a la solución del suelo y su efecto en el cultivo de tomate.

HIPÓTESIS ALTERNATIVA

La liberación y disponibilidad de los nutrientes de las fuentes estudiadas será decreciente en el tiempo con base en las mediciones de la concentración de iones en el suelo, además, será posible determinar el momento de máxima liberación y agotamiento del aporte mineral, lo que permitirá adecuar aplicaciones complementarias vía fertirriego.

REVISIÓN DE LITERATURA

Origen y clasificación taxonómica del cultivo

Según diversas investigaciones, no se ha establecido con precisión el lugar de domesticación del cultivo de tomate, aunque hay evidencia que sugiere un proceso de domesticación simultáneo en las regiones de los Andes peruanos y en el centro de México (Peralta & Spooner, 2007). A lo largo de la historia, el cultivo de *Solanum lycopersicum* L. ha desempeñado un papel crucial tanto en el ámbito comercial como alimenticio en el desarrollo de grandes civilizaciones en Mesoamérica (Toledo & Barrera-Bassols, 2020). Este proceso de domesticación se ha dado lugar al desarrollo de variedades nuevas que cumplan con las características de calidad del mercado en formas, tamaños y colores de frutos (Monge-Pérez & Loría-Coto, 2021).

Producción mundial

En la actualidad, el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) se produce en 88 países a nivel mundial. En 2023, este cultivo generó un valor de producción de 85,424,854 dólares estadounidenses y un volumen de aproximadamente 294,100,950 toneladas, cultivadas en 5,171,195 hectáreas. Los principales países productores son China, con 67,636,724 toneladas, seguido por India, con 21,181,000 toneladas, y Turquía, con 13,095,258 toneladas (FAO, 2023).

Producción nacional

En México, durante el año 2023, el cultivo de tomate generó un volumen de producción de 3,636,927 toneladas, cultivadas en 50,530 hectáreas, siendo Sinaloa el estado con mayor producción (SIAP, 2023). Este cultivo representó el 21.1% de la producción nacional de hortalizas. Además, el consumo per cápita de tomate fresco en el país fue de 14.1 kg, y su comercio internacional generó ingresos de 2,181,983,171 dólares (SIAP, 2023).

Funcionalidad del N, Ca y K en el cultivo de tomate

Entre los macroelementos esenciales para el adecuado crecimiento y desarrollo del cultivo, el nitrógeno (N) y el calcio (Ca) desempeñan funciones estructurales en las plantas. El potasio (K) actúa en gran medida como un activador enzimático y regulador osmótico (Lal et al., 2018). No obstante, la presencia de estos elementos minerales, en diferentes cantidades, regula o estimula funciones específicas dentro del cultivo (Marschner, 2012).

Respecto al N, el elemento cumple funciones estructurales, ya que cerca del 85% del N total en la planta se encuentra formando proteínas, 5% contenido en ADN y ARN y de un 5-10% se encuentra formando compuestos y moléculas de bajo peso molecular (Barker & Pilbeam, 2007). Casi la totalidad del NH_4^+ absorbido es sintetizado en el sistema radicular a aminoácidos y transportado por el xilema, mientras que el NO_3^- en su mayoría puede ser transportado bajo esta forma asimilable siendo concentrado en las vacuolas de las células del área foliar (Mengel & Kirkby, 2000). Aunque el cultivo puede absorber las dos formas asimilables del elemento (NH_4^+ y NO_3^-), se ha reportado un efecto fitotóxico del amonio cuando su disponibilidad es mayor al nitrato, afectando principalmente la actividad fotosintética, contenido de pigmentos y actividad enzimática (Zhang et al., 2022). La absorción y después el transporte de las formas asimilables de N a los sitios de demanda está determinada por el balance de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y la temperatura ambiental, relaciones de entre 100/0 y 70/30 permiten resultados positivos en rendimiento del cultivo, mientras que tasas de aplicación de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ cercanas al 30/70 reducen considerablemente el rendimiento (Gong et al., 2019). El potasio está involucrado en el crecimiento meristemático, regulación del estado hídrico de la célula y actividad fotosintética, debido a la alta permeabilidad que presentan las membranas a este ion (Mengel & Kirkby, 2000). Se ha comprobado la regulación osmótica celular del ion en condiciones de estrés hídrico, regulando los procesos de transpiración, así como la entrada y salida de agua de la célula (De Luca et al., 2021). El metabolismo de carbohidratos, la síntesis de proteínas, la activación enzimática, osmoregulación, transferencia de energía y el balance catión-anión a nivel celular dependen de la participación del

K^+ (Pathak et al., 2020). También interviene con el equilibrio de cargas entre aniones orgánicos e inorgánicos y otras macromoléculas, la regulación del potencial eléctrico de la membrana celular y la homeostasis del pH también han sido reportadas para K^+ , dichas funciones están directamente relacionadas con el balance y regulación de los mecanismos de absorción de K^+ /NO_3^- ; Na^+ /NO_3^- y K^+ /Na^+ (Raddatz et al., 2020).

Varios estudios han demostrado que el calcio desempeña un papel crucial en la señalización celular, activando respuestas frente a condiciones de estrés abiótico, como el estrés salino, a través de la regulación de ciertos receptores de Na^+ y la modulación de vías de respuesta descendentes (Seifikalhor et al., 2019). Asimismo, el calcio está involucrado en la respuesta al estrés por altas temperaturas, mediado por proteínas quinasas dependientes de Ca^{2+} (Hu et al., 2021). También participa en la señalización frente a factores bióticos, como el hongo *Piriformospora indica* y otros patógenos en el tomate (Panda et al., 2019). Desde el punto de vista estructural, el calcio regula la permeabilidad de la membrana al formar puentes entre fosfolípidos y proteínas (Thor et al., 2020). Además, contribuye a la formación de pectatos en la membrana celular, lo que facilita la división celular y mejora la estructura celular, resultando en una mayor firmeza y vida útil del fruto (Haleema et al., 2020). Por otra parte, el calcio también interactúa con hormonas como el ácido abscísico (ABA), regulando de manera sistémica la maduración del fruto (Xiong et al., 2021).

El suelo en la nutrición vegetal

El suelo pudiera considerarse como una mezcla de aire, agua y material sólido bajo diversas proporciones, las cuales modifican tanto sus propiedades físicas y químicas (Toymurodovna & Ibrohimovna, 2022). La composición promedio del suelo bajo condiciones ideales presenta 45% de fracción mineral, 5% de materia orgánica, 25% de aire y 25% de agua, esta fracción líquida es conocida como agua del suelo o solución del suelo, siendo el medio en el que se mantienen biodisponibles algunos elementos minerales considerados como esenciales para el cultivo (Strawn et al., 2020). Otra conceptualización de la solución del suelo se

refiere a esta como un sistema natural, abierto y dinámico, cuya composición resulta del conjunto de reacciones interactivas entre los minerales del suelo, materia orgánica y metabolismo biológico (Schwab, 2012). Sin embargo, tanto los niveles de biodisponibilidad de los elementos minerales en sus formas absorbibles y algunos factores propios de la solución del suelo como el potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción, son afectados por un sistema de interacciones de factores bióticos, abióticos y antropogénicos.

Intercambio iónico

El intercambio iónico se puede definir como el conjunto de procesos reversibles mediante que las partículas coloidales del suelo (absorbentes), debido a la carga que soportan, retienen los iones que son los cationes y aniones, de la disolución del suelo, liberando al mismo tipo otros iones en cantidades equivalentes a las absorbidas, logrando un equilibrio entre ambas fases (Navarro, 2013). En forma general, el proceso de intercambio iónico en suelos puede representarse por la reacción:



Aplicando nutrientes que sean cationes como el calcio, magnesio, potasio y sodio al suelo, se puede considerar que en cada uno de ellos se repetirá la ecuación de sustitución anteriormente indicada. Cuando se obtiene el equilibrio de saturación para cada uno de ellos, se tendrán todos y cada uno de los cationes en las partículas del suelo son reemplazados por otros cationes y al conjunto total de todos los miliequivalentes necesarios para reemplazar los diversos cationes de 100 g de suelo es lo que se conoce como capacidad de intercambio catiónico. Este proceso permite hacer disponible para la planta los elementos mediante su paso a la disolución del suelo, actuando como un regulador.

El proceso de intercambio catiónico permite que los nutrientes que están absorbidos en forma intercambiable sean reemplazados por otros, saliendo de la disolución para ser absorbidos por las plantas; también que los cationes contenidos en los fertilizantes puedan ser almacenados en el suelo por este

proceso de intercambio. Por tanto, es fundamental conocer que cantidad de cationes puede retener el suelo y otros materiales coloidales. Por eso es importante definir la capacidad de intercambio catiónico (CIC) como la cantidad total de cationes absorbidos en forma intercambiable por unidad de masa (o peso) que retiene el suelo: CIC (cmol_c/Kg).

Temperatura

De acuerdo con (López, 2006) ya está más que comprobado que cuando se aumenta la temperatura del suelo el equilibrio se desplaza y el complejo cede cationes a la disolución. Esto indica que el poder absorbente del suelo disminuye de intensidad al aumentar la temperatura y tiene una gran importancia en el desarrollo del cultivo, puesto que contribuye a incrementar la concentración de la disolución del suelo durante el periodo de altas temperaturas, que corresponde al periodo de máxima actividad de la planta y cuando la temperatura del suelo va mucho el proceso de CIC tiene a bajar mucho y la disponibilidad de los nutrientes hacia la disolución del suelo es muy poca y no alcanza a cubrir el requerimiento de las plantas.

pH

El pH es una propiedad del suelo que indica la capacidad de las partículas de suelo para adsorber iones hidrógeno (H⁺), la cual determina si un suelo es ácido o alcalino. Esta propiedad influye en la solubilidad, movilidad, disponibilidad de nutrimentos y otros constituyentes inorgánicos presentes en el suelo. El intervalo normal de pH en el suelo oscila entre 3.5 (muy ácido) a 9.5 (muy alcalino). En suelos ácidos la actividad de los organismos es inhibida por las cantidades tóxicas de aluminio y magnesio, mientras que en condiciones alcalinas algunos nutrimentos disminuyen su disponibilidad, por lo que para suelos agrícolas el valor de pH recomendado es de 6.5 (FAO, 2019).

La acidez o la alcalinidad se miden en unidades de pH (concentración de iones de hidrógeno) con una escala de 1 a 14. Las lecturas entre 0 y 7 se dicen que son ácidas, mientras que las lecturas que oscilan entre 7 y 14 son alcalinas o

básicas, si bien los valores extremos no ocurren en los suelos agrícolas. El pH=7 es neutro. La acidez aumenta con los valores de 7 a 4 y la alcalinidad de 7 a 10. (Rawson & Gómez, 2020)

Uso de fertilizantes en la agricultura

A lo largo de los años, se ha sabido que el suelo funge como una reserva de nutrientes minerales, disponibles en mayor o menor medida. La disponibilidad de estos está en función del tipo de suelo (estructura y composición), además de ritmo de explotación y el manejo del mismo. Sin embargo, en esquemas de producción intensiva, se ha hecho común el uso de fuentes fertilizantes que aportan de forma más rápida y asimilable, los nutrientes que el cultivo requiere (Ramírez-Wong et al., 2014).

La disponibilidad de nutrimentos en el suelo determina la cantidad y calidad de la producción agrícola. Por lo tanto, el suministro de forma regular de nutrimentos, nitrógeno, fósforo y potasio, principalmente, es necesario para mantener la fertilidad de los suelos agrícolas y obtener mejores rendimientos (Amtmann & Armengaud, 2009).

El incremento poblacional ha hecho necesario que la producción de alimentos se incremente de manera sustancial, lo que conlleva un aumento en el uso de fertilizantes químicos (Timilsena et al., 2015). A pesar de permitir mayor productividad de los cultivos, su baja eficiencia de aprovechamiento provoca contaminación ambiental, además de afectar las comunidades microbianas benéficas que se encuentran en los suelos (Geisseler & Scow, 2014).

El conocimiento de la química y funcionalidad de los fertilizantes, su rol a nivel agrícola y los factores que afectan sus funciones está en continuo estudio. Recientes investigaciones se han centrado en evaluar el impacto de los fertilizantes químicos en la salud y el medio ambiente. Se encontró que las plantas sólo aprovechan una pequeña proporción del fertilizante aplicado al suelo. Además, la adición de fertilizantes muchas veces no toma en cuenta el suministro de nutrimentos por parte del suelo, por lo que la fertilización a menudo no concuerda con las necesidades de la planta (Shaviv, 2001; Trenkel, 2010).

El nitrógeno es uno de los nutrientes más importantes para el crecimiento de las plantas, por lo que se requieren en altas cantidades y se considera el principal factor limitante para la producción de los cultivos (Castilla, 2005; Lubkowski, 2016). Sin embargo, de los nutrimentos necesarios para las plantas, el nitrógeno es el más difícil de manejar, ya que la incorporación al suelo a través de los fertilizantes nitrogenados es ineficiente debido a la gran pérdida por lixiviación de nitratos (NO_3^-) que se movilizan rápidamente a aguas subterráneas y superficiales, o reacciona con el medio y se pierde por desnitrificación, y también se pierde por volatilización en forma de amoníaco (NH_3) hacia la atmósfera, provocando contaminación ambiental (Sattari et al., 2014).

Los fertilizantes nitrogenados son más susceptibles de perderse a través de procesos como son lixiviación, desnitrificación y mineralización. La lixiviación de nitratos incrementa por la cantidad y forma de aplicación de las láminas de riego (Dave et al., 1999).

Después del nitrógeno, el fósforo es el segundo nutrimento de mayor importancia para las plantas, y que con mayor frecuencia se encuentra de manera limitada en los suelos. Se absorbe principalmente como ión ortofosfato primario (H_2PO_4^-) y con menor rapidez como ion fosfato secundario (HPO_4^{2-}). Estas formas de absorción dependen esencialmente del pH del suelo, ya que el H_2PO_4^- se encuentra de manera abundante a un pH menor de 7 y el HPO_4^{2-} se encuentra por encima de este valor (Salisbury & Ross, 1992).

La pérdida de fósforo se debe al lavado por las lluvias en la superficie y la mineralización, lo que vuelve indisponible para las plantas dicho elemento (Timilsena et al., 2015). Además, es un nutriente con baja tasa de recuperación y de disponibilidad limitada (Sattari et al., 2014). El uso indebido de fertilizantes fosforados podría ocasionar problemas tales como la degradación de suelos y la contaminación del agua para consumo humano y para el riego (Baligar et al., 2001; Fixen et al., 2015). Existe una situación similar para el potasio, ya que queda fijado por los coloides del suelo y forma diferentes compuestos minerales y orgánicos, lo que lo vuelve indisponible para las plantas. Del total de potasio en el suelo, cerca del 0.1-2% se encuentra en la solución como ion K^+ . Es decir, la

planta puede absorberlo de manera inmediata. Sin embargo, esta forma asimilable se pierde principalmente por lixiviación y escorrentía superficial; aproximadamente del 1-2% se encuentra en forma intercambiable pero lentamente disponible para las plantas; entre el 1-10% se encuentra fijado en los coloides o no intercambiable y lo convierte en potasio muy lentamente disponible; entre el 93-98% forma parte de compuestos minerales, es decir potasio estructural que está en forma no disponible para las plantas (Mengel & Kirkby, 1980).

Dicho lo anterior, del total de fertilizantes convencionales aplicados al suelo, alrededor del 40-70% de nitrógeno, el 80-90% de fósforo, el 10-30% de potasio y el 50-70% del total de fertilizantes se pierden por diversos procesos. Estos niveles de pérdida de nutrientes no solo implican mermas económicas sino también una gran contaminación al ambiente (Baligar & Bennett, 1986; Dave et al., 1999; Wu et al., 2008).

En la actualidad, los científicos agrícolas enfrentan varios retos para la producción de alimentos, tales como baja eficiencia en el uso de fertilizantes, rendimientos estancados, erosión y disminución del contenido de materia orgánica en el suelo, cambio climático, disminución de la superficie agrícola, baja disponibilidad de agua para riego y escasez de mano de obra. A pesar de este panorama, debe mantenerse la producción continua de alimentos para cubrir la demanda a nivel global (Cotler et al., 2020). Es por esto la industria de fertilizantes ha realizado diversas investigaciones y avances para mejorar la tecnología de éstos, con el principal objetivo de mejorar la eficiencia de su uso y aminorar los daños ambientales ocasionados por el uso desmedido de fertilizantes convencionales (Klock-Moore & Broschat, 1999).

Liberación de nutrientes

El modelo de liberación se aplica para estimar el coeficiente de difusión efectiva lo cual nos permite estimar y comprender los mecanismos de transporte que ocurren durante el proceso de liberación de los fertilizantes granulados de lenta liberación. La difusión y el hinchamiento de las cadenas poliméricas del granulo

son los principales procesos que van a regular la liberación de los nutrientes a través de la matriz polimérica del granulo (Andreetta, 2003). Este proceso se lleva a cabo cuando la molécula de agua atraviesa la matriz polimérica estimulando por un gradiente de concentración, alcanzando un equilibrio en el medio circundante. El hinchamiento se lleva a cabo cuando la matriz polimérica que inicialmente se encuentra en estado cristalino sufre una transición vitrea y se transforma en un hidrogel. Cuando los nutrimentos presentes en el suelo de forma natural no están disponibles para las plantas, por su baja solubilidad, se favorece y aumenta la liberación de los nutrientes del fertilizante (Ganetri et al., 2021). Ambos mecanismos están caracterizados por disminuir su velocidad de liberación con respecto al tiempo (Fernandez et al., 2010)

Fertilizantes de liberación lenta (FLL)

Los fertilizantes de liberación lenta fueron desarrollados y han sido ampliamente usados para mejorar la eficiencia de uso de los nutrientes, permiten reducir la lixiviación de éstos y las emisiones de gases de efecto invernadero (Yuan, 2014). Los fertilizantes de liberación lenta son abonos orgánicos e inorgánicos envueltos por una membrana semipermeable, cuando se aplican riegos o llueve se disminuye la tensión superficial, aumenta la presión osmótica y el ion se libera a la solución del suelo que rodea a la capsula. A medida que el granulo se disuelve aumenta la presión exterior, tienden a igualarse y la membrana vuelve a cerrar sus poros (Soldat et al., 2007). Dicho fertilizante cuenta con la característica de liberar los nutrientes a un ritmo más lento, pero los factores como la velocidad, el patrón y duración de la liberación no están bien controlados y pueden verse fuertemente afectados por las condiciones de manipulación, como el almacenamiento, transporte, aplicación en campo, además de las condiciones del suelo como la humedad, temperatura (Shaviv, 1996). Otra de las características de este tipo de fertilizante es que depende completamente de la descomposición por los microorganismos. La aplicación de este producto aumenta la eficiencia de la disponibilidad de nutrientes y reduce la degradación ambiental (Kaarstad et al., 1990).

Recubrimientos

Los recubrimientos que se aplican en los fertilizantes envuelven al granulo ya que actúa como una membrana semipermeable que está constituida por sustancias insolubles o de baja solubilidad. Las características que tiene que contar un recubrimiento dependen mucho del material, grosor, porosidad siendo estos los que determina el patrón de liberación, la membrana tiene una resistencia para evitar grietas, la disolución del nutriente se lleva a cabo cuando el agua va atravesando el recubrimiento (Irfan et al., 2018).

Existen diferentes tipos de materiales utilizados como recubrimientos que generalmente se clasifican en tres categorías: Compuestos minerales inorgánicos (yeso, bentonita, azufre) (Choi y Meisen, 1997), polímeros orgánicos derivados del petróleo (poliolefinas, polietileno, poliuretano, poliestireno, hidrogel, poliacrilamida, poliacetal, polodopamina) (Yang et al., 2012) y materiales poliméricos biodegradables naturales (lignina, carboximetilcelulosa, almidón y quitosan) (Majeed et al., 2017)

Los recubrimientos tienen diferentes coeficientes de permeabilidad al vapor de agua. (Devassine et al., 2002) clasifico los recubrimientos de los polímeros en dos categorías: polímero sintético (coeficiente de permeabilidad de 70 a 3000 $\text{cm}^2 \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$) y los polisacáridos naturales (coeficiente de permeabilidad de 4000 a 12 000 $\text{cm}^2 \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$) los polisacáridos contienen demasiados grupos hidrófilos (hidroxilos), los coeficientes de permeabilidad al vapor de agua de los polisacáridos son más altos que los de materiales poliméricos sintetizados. El autor ya mencionado reporta resultados de la prueba de permeabilidad, en los cuales el biopolímero y el ácido poliláctico fueron los mejores polímeros para el recubrimiento de fertilizantes de lenta liberación.

A lo largo del tiempo se han desarrollado comercialmente diferentes tipos de recubrimientos para mejorar los fertilizantes de lenta liberación, pero para el nitrógeno aplicado al suelo es al que más se han hecho investigaciones. Los materiales utilizados para recubrir la urea generalmente crean una barrera entre el fertilizante y el medio ambiente para evitar la entrada del agua, lo que disminuye la velocidad de disolución de la urea cuando se aplica al suelo (Guo et

al., 2005). Los gránulos del fertilizante están cubiertos por diferentes paredes y se liberan a través de la difusión osmótica en el agua. Los materiales de recubrimiento que se encuentran en el mercado inicialmente son productos a base de azufre desarrollados hace 50 años (Waddell et al., 2000). Sin embargo, la fabricación de cubiertas de azufre ha bajado su producción debido al alto costo de inversión, la baja eficiencia, la fragilidad y la facilidad de agrietamiento y los resultados inconsistentes (Azeem et al., 2016).

Los materiales de recubrimiento más nuevos que incluyen resinas o polímeros han ganado terreno en las últimas dos décadas (Peacock y DiPaola, 1992).

La tasa de liberación de nitrógeno depende en gran medida de la humedad del suelo, la temperatura, la actividad microbiana, el grosor de la capa de recubrimiento. (Sanderson y Fillmore, 2012). Para lograr una mayor eficiencia de liberación de los elementos, los materiales de recubrimiento deben presentar una biodegradabilidad razonable para facilitar la infiltración de agua y una resistencia a la compresión suficiente para soportar el agrietamiento bajo tensiones ambientales externas ocasionado por la temperatura, humedad, pH y la actividad de los microorganismos, todo esto en el suelo.

Los fertilizantes de lenta liberación con recubrimiento de polímero también se han desarrollado con biorremediación. Pueden mejorar la actividad microbiana al proporcionar los nutrientes esenciales que requieren los organismos para su crecimiento y metabolismo, prolongando la duración de las biodegradaciones naturales en el suelo contaminado (Lee et al., 1993).

Partiendo de este concepto, se ha considerado la posibilidad de utilizar materiales de recubrimiento biodegradables para encapsular cepas microbianas naturales o artificiales específicas como productos biofertilizantes. Existe una tendencia generalizada en el desarrollo y evaluación comercial de materiales biodegradables, especialmente aquellos de origen natural, que pueden convertirse en el único método considerable de aplicación de fertilizantes de liberación lenta desde la perspectiva de los nuevos requisitos (Calabi-Floody et al., 2018).

Los polímeros biodegradables sintéticos, como el ácido poliláctico, el alcohol polivinílico, la polidopamina y los derivados de recursos naturales como el poli(3-hidroxibutirato), ahora son ampliamente aceptados como biopolímeros y se utilizan en el desarrollo de varios recubrimientos de polímeros (PC)-SRF. (Costa et al., 2013; Jia et al., 2013) descubrieron que el almidón-g-poli(L-lactida) es un material valioso para recubrir el granulo de urea que retrasa la liberación de nutrientes. También han desarrollado un fertilizante de urea de liberación lenta eficaz utilizando biocarbón (de paja de maíz, paja de arroz y hojarasca forestal) y el copolímero a base de agua de copolímeros de PVA y polivinilpirrolidona (PVP) como materiales de recubrimiento. (Majeed et al., 2015) han revisado exhaustivamente algunos polímeros biodegradables y sus compuestos aplicados en procesos de fertilizantes de liberación lenta. Los materiales biodegradables naturales crudos, como el almidón, la celulosa, la lignina, la quitina y las proteínas, no se pueden utilizar como material de recubrimiento eficaz en forma natural debido a sus propiedades inherentes. Se han desarrollado varias modificaciones químicas y físicas para superar estas debilidades y mejorar su rendimiento (Bao et al., 2018; Dong et al., 2014).

El hidrogel o polímero superabsorbente, tiene la capacidad de retener el doble de su peso de agua, se prevé que el hidrogel puede almacenar nutrientes de manera eficaz a través de interacciones fisicoquímicas y evitar la liberación de nutrientes antes de que se desintegre el granulo. En aplicaciones agrícolas, los hidrogeles permiten disminuir el consumo de agua y la frecuencia de aplicaciones de los riegos (Duan et., 2022). Las ventajas que se tiene por utilizar el hidrogel como recubrimiento es que mejora la aireación, disminuye la degradación del suelo, aumenta la capacidad de retención de agua en el suelo, reduciendo la erosión del suelo, disminuye el estrés en las plantas y la retención de los nutrientes en el suelo (Guo et al., 2005). Dicho material se puede preparar a partir de polímeros hidrófilos en los que las cadenas de polímeros reticuladas por entrelazamiento físico e injerto químico forman una estructura tridimensional que les permite absorber y retener una gran cantidad de agua incluso bajo presión externa (Wang et al., 2012).

Los fertilizantes de lenta liberación basados en propiedades de hidrogel deben satisfacer la tasa de encapsulación de los nutrientes de un mínimo del 85% en peso sin considerar la función de retención de agua (Azeem et al., 2014). El hidrogel se puede dividir en sintéticos y naturales, todo esto depende mucho de donde se obtiene el material. Los polisacáridos naturales (como el almidón, la celulosa, el quitosano, el alginato y sus derivados) y los basados en polipéptidos (como la gelatina, el colágeno y la proteína aislada de soja), los sintéticos más comunes están hechos de monómeros hidrófilos derivados del petróleo, como la acrilamida (AM), el ácido acrílico (AC), el ácido metacrílico (MAC) o copolímeros de AM y AC. Mientras que los sintéticos-naturales se preparan a partir de materiales sintéticos y naturales/inorgánicos. La combinación del hidrogel y fertilizantes en un solo material es la tendencia más reciente en el campo de los fertilizantes de lenta liberación (FLL). Este tipo de FLL puede describirse como un "mini depósito", que puede suministrar nutrientes y agua para el crecimiento de las plantas durante un período prolongado a través de la diferencia de presión osmótica (Ramli, 2019).

En cuanto a las diversas formas de aplicar el recubrimiento, los más utilizados son las de tambor rotatorio, el recubridor de bandeja y el recubridor de lecho fluidizado (Devassine et al., 2002). En la Figura 1 se muestra una representación esquemática del recubrimiento mediante (A) un recubridor de tambor rotatorio y (B) un recubridor de lecho fluidizado. (Brown y Fogler 2008) sintetizaron gránulos de urea de liberación lenta utilizando un recubridor de tambor rotatorio mediante la composición de yeso, cemento, azufre y zeolita. Se evaluaron varios factores, incluidos el espesor, la tasa de evaporación del disolvente y los diferentes tipos de cera que afectaban la tasa de liberación de urea. En este sistema, el cemento actuó como aglutinante mientras que la zeolita proporcionó retención de agua a las partículas. Los gránulos de urea se pusieron en movimiento girando en un tipo tambor de acero inoxidable a una velocidad de 52 rpm. El material de formulación de recubrimiento en forma de polvo se utilizó para rociar sobre los gránulos giratorios y se aplicó agua gradualmente. El recubrimiento por lotes se procesó durante 20 minutos y se secó con aire caliente.

Q. Duan et al.

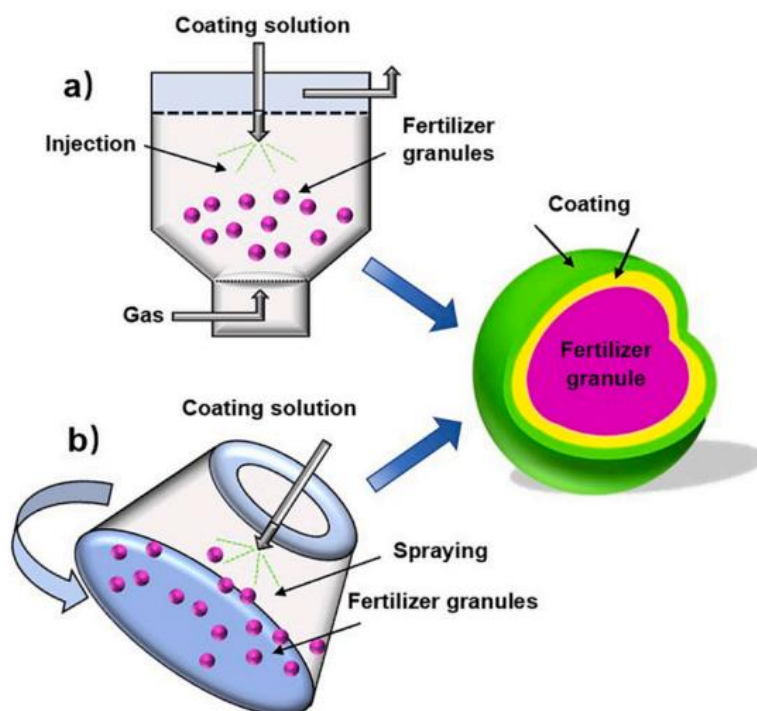


Figura 1. Representación esquemática del recubrimiento mediante (A) un recubridor de lecho fluidizado; (B) un recubridor de tambor rotativo.

De acuerdo con estas técnicas de recubrimiento se analizó el tamaño de partícula, el porcentaje de recubrimiento, la velocidad de rotación, el caudal de pulverización y la cantidad agua, todo esto para dar con los parámetros correcto de calidad para el fertilizante de lenta liberación. Se recomienda una mezcla de yeso y azufre molido para producir un polvo fino como material de recubrimiento con agua purificada como aglutinante. Los materiales de recubrimiento fino se mezclaron con los gránulos de urea en la bandeja giratoria, donde se añadió agua de forma controlada. Este proceso se repitió hasta que se cubrió por completo la urea y los materiales de recubrimiento; de esta manera, se obtuvo una capa de recubrimiento uniforme. A continuación, los gránulos de urea recubiertos se secaron con aire soplado. Se investigaron las condiciones de procesamiento para el recubrimiento. Se descubrió que un tamaño de partícula de 2.80 mm, un

porcentaje de recubrimiento del 25 %, una velocidad de rotación de la bandeja de 16 rpm, un caudal de pulverización de 53 g/min y un 1.50 % de agua pulverizada eran condiciones optimizadas. En tales condiciones optimizadas la eficiencia del producto, la urea recubierta aumentó aproximadamente un 13 %. El método más simple para medir el contenido de fertilizante y calcular la masa de los materiales recubiertos es pesar los gránulos de fertilizante antes y después del recubrimiento. Además, el diámetro de los gránulos de fertilizante modificados se puede determinar midiendo gránulos seleccionados aleatoriamente utilizando un calibrador digital. De esta manera, el espesor del recubrimiento se puede calcular en función del diámetro de los gránulos antes y después del recubrimiento (Eghbali Babadi et al., 2019).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento

El estudio se realizó en un invernadero tipo sierra modificada sin control climático y con apertura mecánica de la ventilación, ubicado en el Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, México, el cultivo estudiado se estableció en suelo, durante el periodo Mayo-Octubre del 2023.

Se mandó a analizar el contenido de sales del agua que se utilizó para regar el cultivo y se realizó un análisis de extracto pasta saturada en donde se instaló el experimento.

Diseño experimental

Se evaluaron seis tratamientos distribuidos bajo un diseño de bloques completos al azar (DBCA) tal y como se detalla: T1: 200 kg ha⁻¹ de Blaukorn Classic Compo Expert 12-8-16(+3Mg+TE), T2: 250 kg ha⁻¹ de Blaukorn Classic Compo Expert 12-8-16(+3Mg+TE), T3: 300 kg ha⁻¹ de Blaukorn Classic Compo Expert 12-8-16(+3Mg+TE), T4: 250 kg ha⁻¹ de una mezcla física 48.7-10.3-10.7(+16.5Mg+Mo) de la empresa Keswick, T5: 250 kg ha⁻¹ de un fertilizante genérico Triple 17 (17-17-17) y T6: Testigo absoluto sin fertilizar. Cada tratamiento se evaluó en cuatro repeticiones y cada repetición constó de una población de 11 plantas, establecidas en surcos a 1.8 m de separación e hilera sencilla con una distancia entre plantas de 0.3 m. Previo al establecimiento del cultivo se realizó un análisis de suelo y agua.

Material Vegetal

Se utilizó semilla de tomate tipo saladette del híbrido Moctezuma F1 (Harris & Moran, Davis, CA, USA). La siembra se realizó el 15 de mayo del 2024, en charolas de germinación de 200 cavidades y como sustrato se utilizó turba de sphagnum al 100% (v/v).

Preparación y desarrollo del experimento

Los tratamientos se aplicaron utilizando la técnica de fertilización de fondo consistente en colocar los fertilizantes granulados a una profundidad de 15 cm y 10 cm de separación del centro del surco, para después poner la cintilla de riego, todo esto se hizo antes de la instalación del acolchado.

La siembra del material seleccionado se realizó el 15 mayo utilizando charolas de 200 cavidades para su óptimo desarrollo, se empleó como turba de sphagnum como sustrato para siembra, la semilla se colocó a una profundidad de 0.5 cm y se cubrió con el mismo sustrato, para inducir la germinación se cubrió con un plástico negro durante 72 horas, posteriormente se dejó en el invernadero para la emergencia y crecimiento de la plántula. El trasplante se realizó el 16 de junio de 2023, en hilera sencilla con distancia de 30 cm entre plantas, obteniéndose una densidad de siembra de 3 plantas por m², se manejó un tutorado tipo holandés, la distancia entre surcos fue de 1.80 m y se instaló sistema de riego por goteo consistente en una cintilla por surco, con emisores a cada 20 cm, gasto de 1.2 lph a una presión de 14 PSI.

Mediciones de la concentración de iones en suelo

Se midió la concentración de los iones NO₃⁻, K⁺, Na⁺ y Ca²⁺ en solución de suelo, para ello, se instalaron lisímetros de succión SSAT 12 (Irrometer Company, Inc., CA, USA) colocados a 15 cm entre plantas y a 20 cm de profundidad, se realizó un vacío hasta los 60 Kpa, empleando una bomba de vacío SSAT 1002 Vacuum Pump (Irrometer Company, Inc., Riverside, CA, EUA), la primera muestra se obtuvo a los tres días después del trasplante, posteriormente se obtuvieron muestras de forma semanal. A la solución de suelo obtenida se le midió la concentración de NO₃⁻, K⁺, Na⁺ y Ca²⁺, empleando ionómetros (HORIBA, Kyoto, Japón) con los modelos LAQUAtwin-NO3-11, K-11, Na-11 y Ca-11 para NO₃⁻, K⁺, Na⁺ y Ca²⁺ respectivamente, calibrados a dos puntos (150 y 2000 mg L⁻¹), expresándose los resultados en mg L⁻¹.

Medición de pH y Conductividad eléctrica

A la muestra de solución de suelo obtenida anteriormente se le midió pH y CE, empleando ionómetros LAQUAtwin pH-11 y EC-11 (HORIBA, Kyoto, Japón) para pH y CE respectivamente, calibrados a dos puntos (4.0 y 7.0 para pH y 1.41- 12.9 mS cm⁻¹ para CE). Los resultados se expresaron en valores de 0 a 14 para pH y dS m⁻¹ para CE.

Variables agronómicas

Diámetro de tallo (DT). Mediante un Vernier mod. 1265 (Truper, México) se midió el diámetro de tallo a 2 cm del suelo, de tres plantas por tratamiento, realizando esta medición desde el momento del trasplante hasta los 180 DDT, los resultados se expresaron en milímetros.

Altura de planta (AP). Se utilizó una cinta métrica (Truper, México) se midió el segmento comprendido de 2 cm del suelo hasta el ápice de crecimiento de la planta, se midieron tres plantas por tratamiento, se analizaron los valores medios obtenidos semanalmente hasta los 180 DDT, los resultados se expresaron en cm.

Ancho de hoja (AH). Se utilizó una cinta métrica (Truper, México) y se midió de forma semanal, la medición se tomó en cada hoja compuesta entre cada racimo, la última toma de datos fue hasta el racimo 9, se analizaron los valores medios obtenidos semanalmente, los resultados se expresaron en cm.

Longitud (LH) Se utilizó una cinta métrica (Truper, México) y se midió de forma semanal, la medición se tomó en cada hoja compuesta entre cada racimo, la última toma de datos fue hasta el racimo 9, se analizaron los valores medios obtenidos semanalmente, los resultados se expresaron en cm.

Variables de calidad comercial

Firmeza del fruto (FF). Para medir la firmeza del fruto se evaluaron cuatro frutos por repetición. Empleando un penetrómetro con una punta de calibre 8 mm (Qa Supplies, VA, USA), expresando los resultados en kg cm².

Sólidos solubles (SS). Para cuantificar los sólidos solubles totales en el fruto, se seleccionaron al azar cuatro frutos por repetición que presentaran la misma coloración de madurez. Esta medición se realizó utilizando un refractómetro digital modelo HI96813 (Hanna, Limena, Italia), y se expresó en % de grados Brix.

Variables de rendimiento

Rendimiento (Rnd) Para determinar el rendimiento se cosecharon los frutos por planta, para sacar este valor se cosecharon 3 plantas por repetición a cada tratamiento y se pesó cada fruto, obteniéndose la sumatoria del peso de frutos por planta, el resultado se expresó en kg.

Frutos por tamaños (FC): Para determinar el tamaño del fruto de tomate se utilizó NMX-FF-031-1997-SCFI - Normas Mexicanas (NMX), los frutos se clasificaron por tamaños XL, L, M y CH, se contabilizaron los frutos en cada rango de clasificación de acuerdo a la norma.

Análisis Estadístico

Se realizó un análisis de varianza ($P \leq 0.05$) bajo un modelo de bloques completos al azar y una prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$). Se empleó el paquete estadístico Infostat V. 2020 (Di Rienzo et al., 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características del suelo

Los análisis realizados al suelo reportaron las siguientes propiedades físicas y químicas: Suelo de tipo calcáreo, con textura franca, 2.17% de materia orgánica, punto de saturación de 81%, capacidad de campo al 43.5%, punto de marchitez permanente al 25.9%, densidad aparente de 1.19 g cm^{-3} , contenido de carbonatos totales igual a 40.5%, pH de 7.97, CE de 5.30 dS m^{-1} , saturación de bases: $\text{Ca}^{2+} = 79\%$ ($18.4 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$), $\text{Mg}^{2+} = 12.6\%$ ($2.93 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$), $\text{K}^{+} = 2.92\%$ ($0.68 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$), $\text{Na}^{+} = 5.36\%$ ($1.25 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$).

Condiciones del agua para fertirriego y solución de suelo

Se analizó el contenido nutrimental del agua que se estuvo aplicando al cultivo como se muestra en el Cuadro 1, además se realizó el análisis nutrimental del extracto de pasta saturada del suelo donde se ha instalado el cultivo de tomate teniendo como resultado la concentración de nutrientes como se describe en el Cuadro 2. Estos análisis sirvieron como base para realizar comparaciones y detectar variaciones de la disponibilidad en solución de suelo, de iones estudiados como calcio, potasio y nitrógeno en forma de nitrato, además de conductividad eléctrica y pH.

Cuadro 1. Análisis de agua de riego utilizada en el cultivo

Cationes	mEq L ⁻¹
Calcio	2.54
Magnesio	1.01
Sodio	4.8
Potasio	0.11
Aniones	mEq/L
Azufre	0.39
Bicarbonatos	6.45
Cloro	1.26
Nitrógeno	0.27
micronutrientes	ppm
Boro	0.35
Hierro	0.017
Manganeso	0.005
Cobre	0.064
Zinc	0.002

Cuadro 2. Análisis de extracto de pasta saturada del suelo en zona de estudio.

Catión	mEq L ⁻¹
Calcio	25.5
Magnesio	9.32
Potasio	1.95
Sodio	15.9
Anión	mEq/L
Nitrógeno	27.3
Fosforo	0.03
Azufre	13.1
Cloro	10.1
Bicarbonato	1.19
micronutrientes	ppm
Hierro	1.48
Manganeso	0.04
Zinc	0.02
Cobre	0.02
Boro	0.48
Ce	5.10 dS/m
Ph	7.29

Las diferentes fuentes fertilizantes, así como las dosis aplicadas al suelo al inicio del ciclo productivo no generaron diferencia significativa para las variables AP, DT, LH, AH, NFXL, NFL, NFM y NCH en cultivo de tomate bajo condiciones protegidas (Cuadro 3). Un alto contenido mineral del suelo, sustentado en un análisis del mismo, aunado a los valores obtenidos en el análisis de pasta saturada para NO_3^- , SO_4 , Ca y Mg indican la nula necesidad de realizar un aporte mineral utilizando fuentes fertilizantes que contengan alguno de estos elementos (Cuadro 2).

Cuadro 3. Prueba de comparación de medias (Tukey ≥ 0.05) para la aplicación de diversos fertilizantes y dosis aplicados de fondo sobre crecimiento y productividad de tomate en invernadero.

Tratamientos	AP (cm)	DP (mm)	LH (cm)	AH (cm)	NFXL (n)	NFL (n)	NFM (n)	NCH (n)	F (kg cm^{-2})	Sólidos Solubles (%)
Testigo	441.75 a	15.50 a	52.5 a	52.75 a	15.25 a	13.25 a	6.5 a	5 a	4.9 abc	3.8 ab
Bkc-200	430.25 a	15.75 a	53 a	52 a	16.25 a	13.75 a	5.5 a	4.25 a	4.68 c	3.82 ab
Bkc-250	441.00 a	15.75 a	51.75 a	53 a	17.5 a	13.5 a	5.5 a	4 a	4.68 bc	3.91 a
Bkc-300	436.5 a	14.75 a	53.75 a	53 a	18.5 a	15.5 a	6.5 a	3.5 a	5.17 a	3.68 b
T17-250	432.25 a	15.00 a	52.5 a	52.5 a	18.5 a	13.25 a	6 a	4.75 a	5.09 ab	3.82 ab
Ksw-250	427.5 a	15.75 a	51.25 a	51.75 a	18.75 a	14.25 a	6 a	4.25 a	5.19 a	3.8 ab
ANOVA Ps	0.735	0.718	0.560	0.985	0.915	0.917	0.867	0.656	0.0008	0.0446
C.V	3.61	7.49	3.77	5.77	28.54	25.3	25.62	33.37	3.08	2.3

AP: Altura de planta, DP: Diámetro de planta, LH: Largo de hoja, AH: Ancho de hoja, NFXL: fruto extra grande, NFL: fruto grande, NFM: fruto mediano, F: Firmeza, G.Brix: Grados brix, T1: testigo absoluto, T2: Blaukorn Classic (200kg), T3: Blaukorn Classic (250kg), T4: Blaukorn Classic (300kg), T5: Triple 17 (250Kg), T6: Keswick (250kg)

(Puentes-Páramo & Menjivar-Flores, 2014) han reportado que un suministro de N, P y K por encima de los requerimientos vía fertilización puede generar desbalances nutricionales que afectarían el rendimiento del cultivo, mostrando pérdida de estos elementos por lixiviación y contaminación del suelo. Por lo anterior, es necesario ajustar la dosis de fertilizantes priorizando el balance nutricional entre la demanda del cultivo y lo que proporciona el suelo y la eficiencia de recuperación del nutriente (Cabalceta et al., 2005).

Variables de rendimiento

Para las variables de NFXL y NFL todos los tratamientos superan al testigo en más del 6% esto indica que, a pesar de no tener diferencia significativa, cada tratamiento por lo menos tuvo dos frutos más por planta en estas categorías, a excepción del testigo. Para la variable de NFM y NCH el testigo superó al resto de los tratamientos con un 3%, esto nos indica que los tratamientos tuvieron una menor producción de frutos de tamaño mediano y chico, en el mercado estos dos tamaños son lo menos deseados para su comercialización ya que prefieren tamaños como: jumbo, extragrande y grande por su calidad y precio. El aporte mineral mediante fuentes fertilizantes vía solución nutritiva a concentraciones altas (125%) puede ayudar a obtener mayor rendimiento, relacionado directamente con el peso y tamaño de los frutos, tal y como lo reportan (Díaz-Vázquez et al. 2023). Lo anterior pudiera compararse con el escenario obtenido al aportar fertilizantes al suelo, aun cuando el contenido mineral de esto permite satisfacer el requerimiento del cultivo, por lo que el excedente en elementos como calcio, potasio y nitrógeno, inciden directamente en el tamaño de los frutos.

Variables de calidad de fruto

Respecto a la variable FF, los tratamientos no muestran diferencia significativa con respecto al testigo, sin embargo, Bkc-300, T17-250 y Ksw-250, con valores de 5.00 – 5.30 kg cm⁻² mostraron diferencia estadística respecto a Bkc-200 (Figura 2).

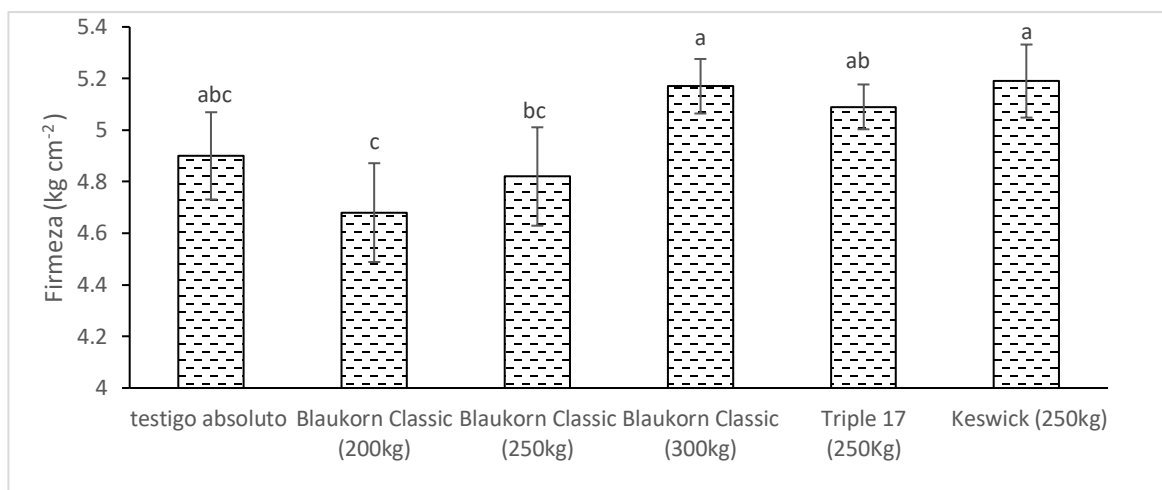


Figura 2. Comparación de medias para la variable de firmeza

Al respecto (Bilalis et al., 2018) mencionan que la fertilización mineral incrementa esta variable, obteniendo valores de 4.63 kg cm^{-2} con fertilización mineral y 4.40 kg cm^{-2} sin su aplicación, (Díaz-Vázquez et al., 2023) obtuvieron valores de 6.86 kg cm^{-2} aplicando una solución nutritiva de Steiner al 125% y 5.33 kg cm^{-2} con una solución Steiner al 50%. La firmeza de los frutos está determinada por varios compuestos que integran la pared celular, entre los que destacan los pectatos de calcio y magnesio (Sahagún et al., 2009). Como el calcio no puede ser transportado por las células translocadoras del floema, los síntomas de deficiencias de calcio se observan en tejidos jóvenes, esto podría producir variación en la distribución del calcio entre racimos incidiendo en los valores de firmeza del fruto (Fry et al., 1992; Salisbury y Ross, 1994). La firmeza también está relacionada con la disponibilidad de calcio en la solución del suelo, ya que dicho elemento se mueve por flujo másico del agua dentro de la planta. Poca disponibilidad de agua en el suelo o un exceso de sales disueltas limitan la absorción de calcio, del mismo modo, el estrés salino reduce los valores medios de la firmeza por la reducción en la absorción de agua y nutrientes (Pérez-Labrada et al., 2019).

Para la variable SS se puede observar que no hay diferencia significativa entre los tratamientos y el testigo absoluto, sin embargo, Bkc-250 con valor de 3.90%

de ° Brix mostró una diferencia significativa respecto a Bkc-300 con 3.66% de ° Brix, este último, mostró una tendencia hacia la baja aún con mayor concentración del producto comercial comparado al resto, contrario a lo esperado, Bkc-250, mostró una mayor concentración de sólidos solubles totales. Particularmente, este tratamiento evaluado en la solución del suelo presentó una conductividad eléctrica de 1.4 dS m^{-1} contra el testigo con una conductividad eléctrica 0.9 dS m^{-1} (Figura 3). Es conocido que una alta concentración salina en la solución del suelo eleva los sólidos solubles totales de frutos como el tomate (Nichols et al., 1995). (Díaz-Vázquez et al. 2023) reportó que las soluciones nutritivas con concentraciones altas aumentaron los sólidos solubles totales hasta un 5.03%.

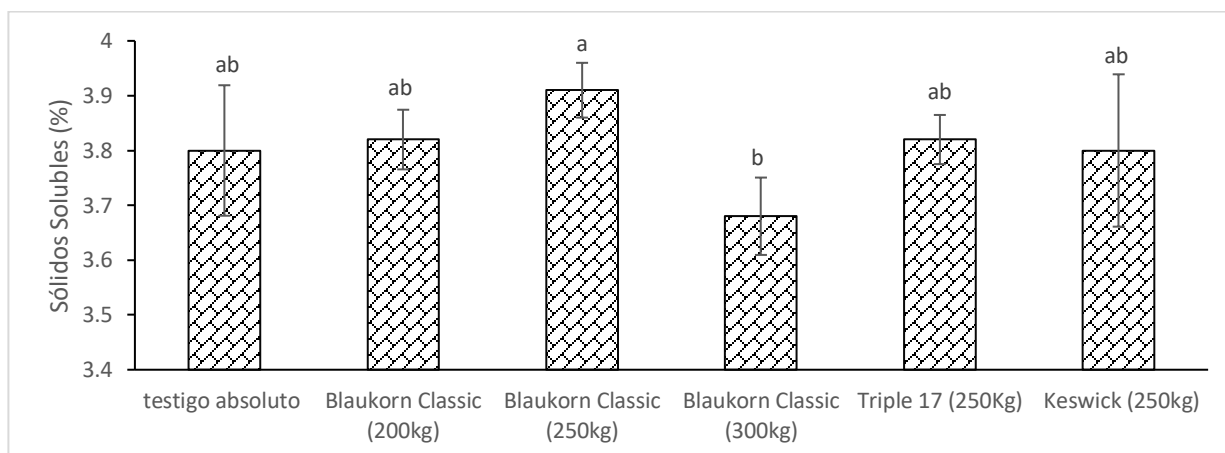


Figura 3. Comparación de medias para la variable de Sólidos Solubles

Se han reportado que al aplicar algas marinas o inducir estrés hídrico a las plantas aumenta los sólidos solubles totales (Zhang et al., 2020), lo anterior modifica el potencial osmótico y la conductividad eléctrica, aunque los autores no reportan datos sobre esta variable. Sin embargo, los elementos aportados como magnesio y fósforo y su disponibilidad en la solución del suelo modifican los ° Brix del fruto, el magnesio es parte fundamental de la clorofila, en el proceso de fotosíntesis y absorción de dióxido de carbono, además de que el fósforo inorgánico aumenta la translocación de fosfoglicerato y triosa fosfato, incrementando la síntesis de sacarosa y otros carbohidratos que incrementan la medición de sólidos solubles totales en los frutos (Mengel y Kirkby, 2000).

Dinámica de ion nitrato

La dinámica del ion nitrato presentó fluctuaciones a lo largo del periodo de evaluación, en función de la dosis y fuente aplicada, así como se muestra en las figuras 4 y 5 respectivamente, en la semana 1 del muestreo se observa que Bkc-200, T17-250 y Ksw-250 generaron concentraciones del ion que superaron al resto de los tratamientos, durante la semana 2 a 5 se observa un comportamiento similar en todos los tratamientos, a diferencia de Ksw-250, el cual tuvo una liberación alta en la semana 5 alcanzando un máximo de 800 ppm, para la semana 13 el testigo absoluto, Bkc-200, Bkc-250, Bkc-300, T17-250 y Ksw-250 mostraron una baja concentración, esto se puede deber a que la planta está consumiendo lo que se encuentra en la solución del suelo, la ante penúltima semana todos los tratamientos aumentaron su concentración hasta 600 ppm, esto nos indica que el fertilizante está liberando el elemento para satisfacer las necesidad del cultivo, en la última semana se puede observar que la concentración de dicho elemento disminuye, ya que el contenido de iones dentro del granulo de fertilizante se está terminando de forma gradual hasta eliminar su presencia completamente en el suelo. El nitrato no interactúa en el intercambio iónico del suelo, ya que puede ser absorbido por la planta, lixivarse o desnitrificarse, en función del volumen de agua y oxígeno en el suelo (Hernández et al., 2014). (Díaz-Vázquez et al., 2023) reportó que una solución Steiner al 125 % aumentó la disponibilidad del nitrato en la solución del suelo en todas las etapas fisiológicas del cultivo y mediante aporte constante. De acuerdo con (López-Astilleros et al., 2020) el contenido de nitrógeno disminuye con el transcurso del desarrollo del cultivo, esto después de 30 días, por lo que su calidad nutricional disminuye en el suelo por los aspectos ya mencionados. (Gioacchini et al., 2006) menciona que los fertilizantes de lenta liberación con diferentes cubiertas generan en etapa inicial cantidades elevadas de nitrato. La liberación de nitrato por la mayoría de las fuentes empleadas y a las dosis evaluadas presenta incrementos significativos al principio de la aplicación y continúa de forma casi lineal durante dos meses, entre los 60 y 90 días no se

observó un aumento de la disponibilidad del ion lo que permite determinar que después de este periodo sería necesario complementar el aporte de nitrato con otras fuentes.

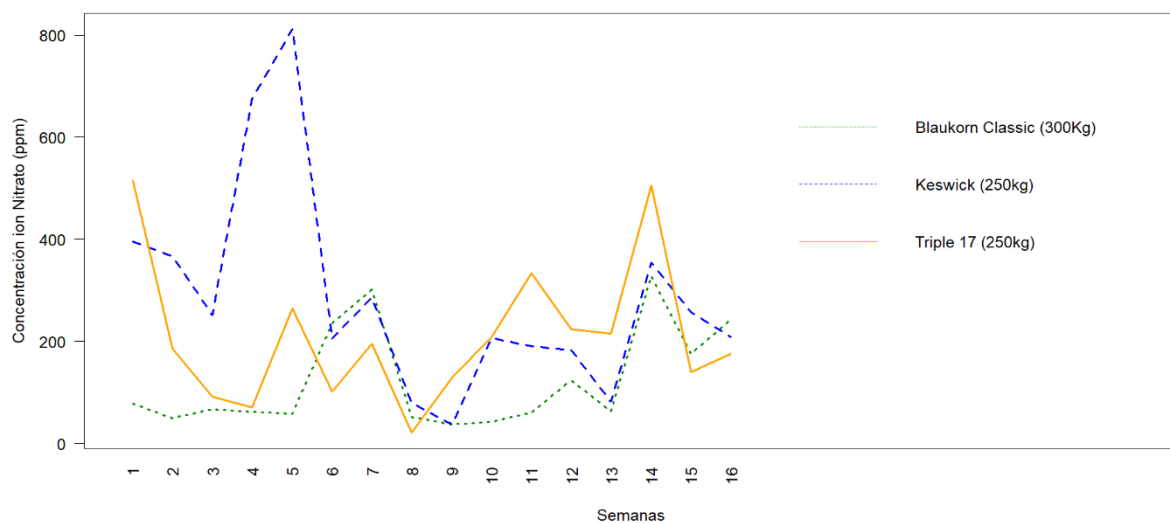


Figura 4. Dinámica temporal y concentración de ion nitrato por efecto de aplicación de diversas fuentes fertilizantes

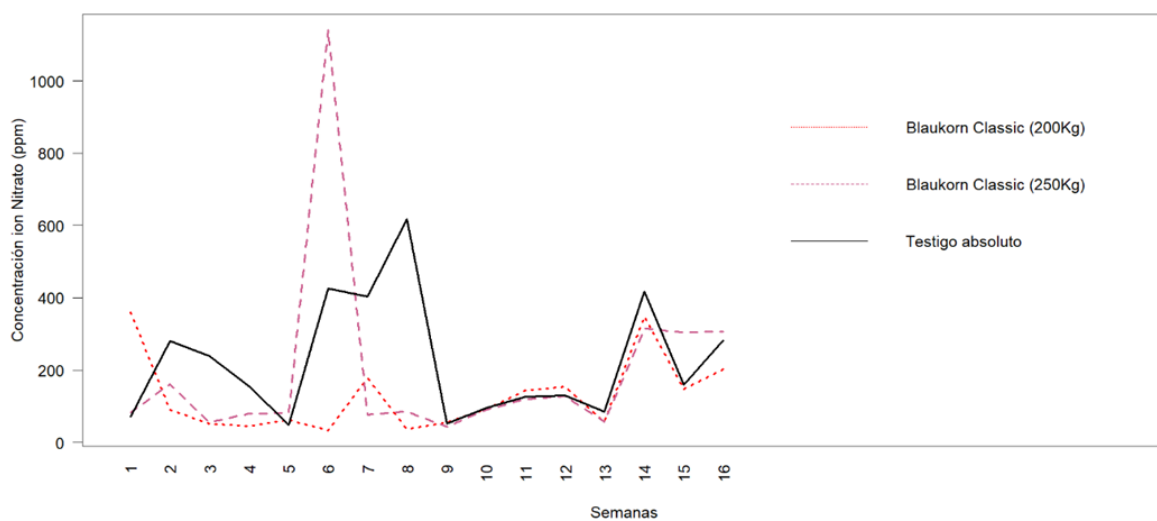


Figura 5. Dinámica temporal y concentración de ion nitrato por efecto de aplicación de diversas fuentes fertilizantes

Dinámica de ion calcio

La dinámica del ion calcio no fue suministrado por los tratamientos, ya que el agua fue el principal aportador de calcio con 2.54 mEq/L, además, el extracto de pasta saturada mostro una concentración de 25.5 mEq/L. De acuerdo con las figuras 6 y 7 entre la semana 1 y 3 el testigo presento una concentración de 500ppm, comparado con los tratamientos que se mostraron con una liberación constante de 200 a 300 ppm, para la semana 6 Bkc-200, Bkc-250, Bkc-300, T17-250 y Ksw-250 incluyendo el testigo disminuyeron hasta 150 ppm, esto se puede considerar una baja concentración ya que el requerimiento adecuado es de 250 ppm. Para semana 9 todos mostraron un incremento de 350 a 450 ppm esto superando su requerimiento adecuado, entre la semana 10 y 14 todos los tratamientos siguen la misma tendencia en su liberación entre la partícula del suelo y la solución del suelo, fue hasta la semana 15 que disparo hasta 400 ppm, hasta la última semana que todos disminuyeron la presencia del ion calcio manteniendo un equilibrio adecuado. El calcio interactúa con otros cationes en la solución del suelo, como el magnesio, potasio y sólido, estas interacciones pueden afectar la solubilidad y disponibilidad (Kretzschmar, 2004). (Canales-Almendares et al., 2021) reporto que la aplicación de fertilizantes solidos tuvo una concentración más alta de calcio, esto se puede comparar con la dinámica del calcio con el magnesio ya que es posible ver una mayor estabilidad alrededor del promedio por parte del magnesio por lo que puede indicar un comportamiento asociado a los procesos de intercambio de cationes, además de que mostro más dinámica con mayor concentración y un rango de variación de cientos de ppm. (Díaz-Vázquez et al., 2023) reportaron que un alto contenido de calcio suministrado por solución nutritiva, más el que se encuentra en el suelo y liberado desde el complejo de cambio, incremento su concentración en la solución del suelo.

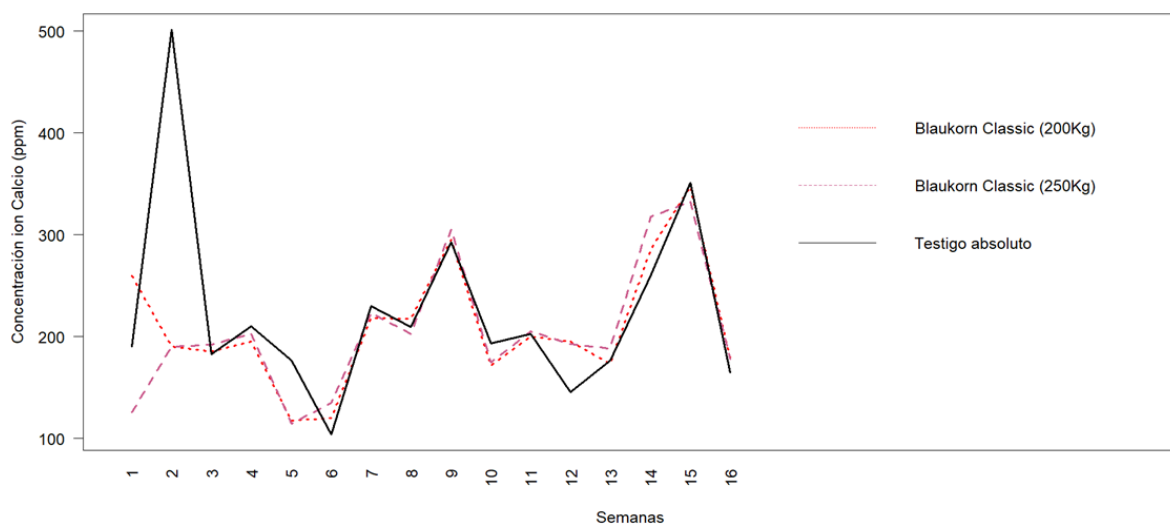


Figura 6. Dinámica temporal y concentración de ion calcio por efecto de aplicación de diversas fuentes fertilizantes

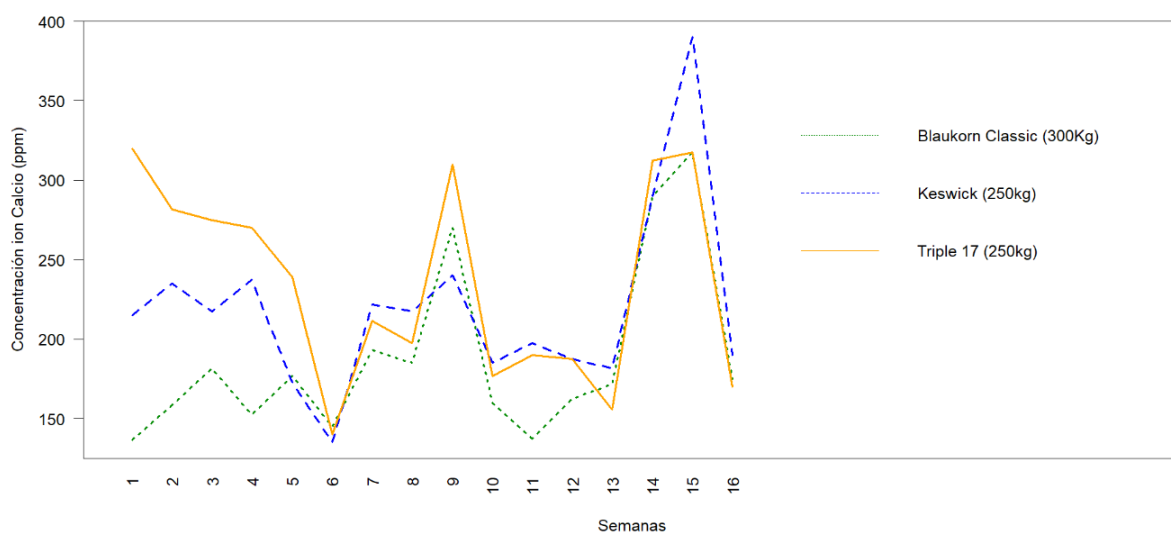


Figura 7. Dinámica temporal y concentración de ion calcio por efecto de aplicación de diversas fuentes fertilizantes

Dinámica de ion potasio

Para el elemento potasio se muestra en las figuras 8 y 9 que el testigo absoluto, Bkc-250, Bkc-300, T17-250 y Ksw-250 mostraron una misma liberación del ion durante el periodo 1 y 5 en donde empezó a disminuir su concentración, a excepción del tratamiento 2 en el cual para la semana 3 mostro un aumento hasta 100 ppm, en el muestro 6 se observa que todos los tratamientos bajaron su concentración en un promedio de 20 ppm, esto se puede relacionar a que la planta para esas fechas se encontraba en la etapa de fructificación y su demanda de dicho elemento aumento, Bkc-300 fue incrementando su liberación hasta 60 ppm para después bajar su presencia hasta 25 ppm, para el resto de los tratamientos mostraron la misma liberación durante el periodo 6 hasta la semana 10, para el resto de las semanas la dinámica del potasio en todos los tratamientos fue muy alta, ya que había muestreos en donde la concentración estaba en 30 ppm hasta 55 ppm, la presencia de este elemento en la solución del suelo disminuyo completamente en la semana 16. De acuerdo con (Canales-Almendares et al., 2021) el fertilizante solido alcanzo los valores más altos durante la etapa de cosecha para los diferentes tipos de suelo y un promedio general de $361. \text{mgL}^{-1}$, además presento una tendencia positiva al igual que el tratamiento de Steiner en la dinámica del potasio en la solución del suelo, pero con picos de concentración que se mostraron después de la floración.

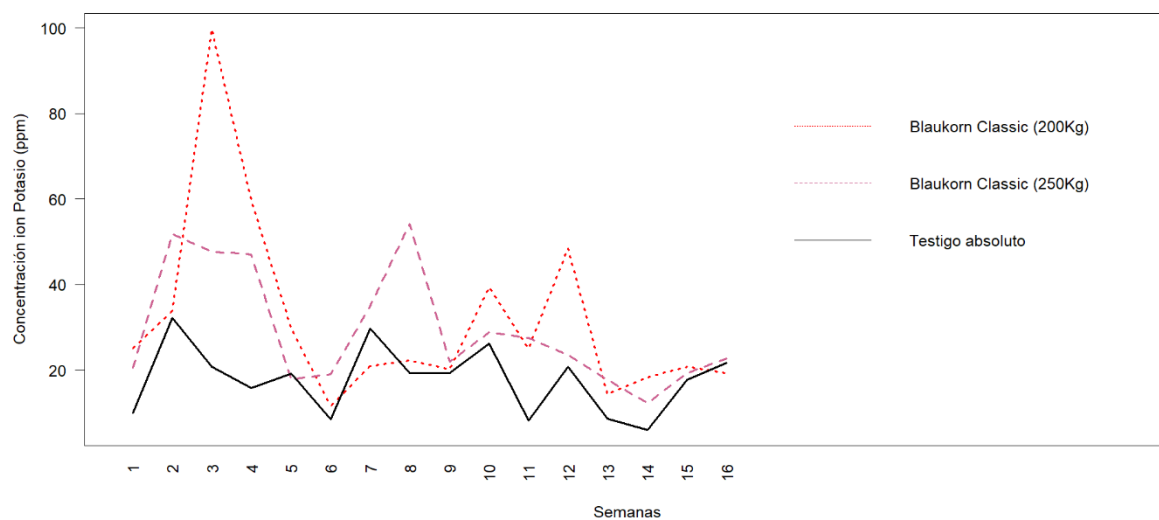


Figura 8. Dinámica temporal y concentración de ion potasio por efecto de aplicación de diversas fuentes fertilizantes

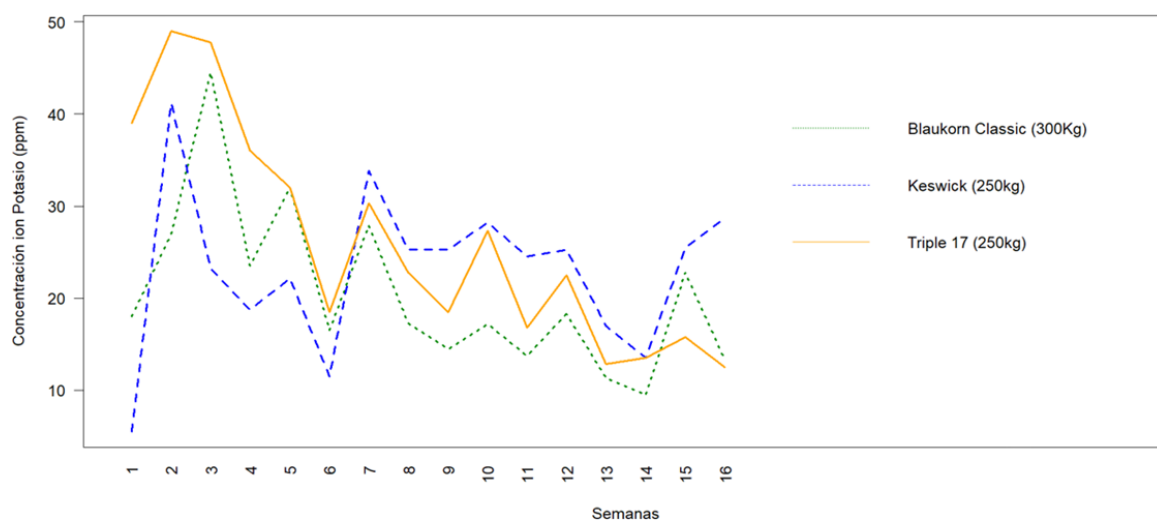


Figura 9. Dinámica temporal y concentración de ion potasio por efecto de aplicación de diversas fuentes fertilizantes

Conductividad eléctrica

Para la variable de conductividad eléctrica (Ce) se puede observar en las figuras 10 y 11 que Bkc-200, Bkc-250, Bkc-300, T17-250 y Ksw-250 su dinámica y liberación de los nutrientes proporcionados por los fertilizantes granulados fue demasiado fluctuante las primeras semanas, el testigo absoluto fue el único que inicio con una concentración baja de sales no fue hasta la semana 5 que fue incrementando su Ce, en lo que coinciden todos los tratamientos es que para la semana 6 bajo su concentración de sales, para después el fertilizante liberar nutrientes durante los periodos 7 y 9 a partir de acá se puede observar en la figura 6 que la concentración de los nutrimentos fue disminuyendo periódicamente hasta la semana 14, en donde aumente la presencia de sales para después bajar en la etapa 16, esta dinámica tan fluctuante se puede atribuir a las diferentes etapas fenológicas del cultivo de jitomate, ya que en cada etapa requiere de ciertas concentración para cumplir con todos sus procesos fisiológicos. (Canales-Almendares et al., 2021) menciona que desde un punto de vista dinámico la Ce fue diferente para los dos tipos de suelos como para las diferentes clases de fertilización aplicados, además durante la fase de crecimiento vegetativo (40 ddt) la mayor Ce se mostraron en los tratamientos con solución Steiner y fertilizantes sólidos, la aplicación de vermicomposta presento los valores más bajos, también reporta que en la etapa reproductiva los valores de Ce umentaron para todos los tratamientos.

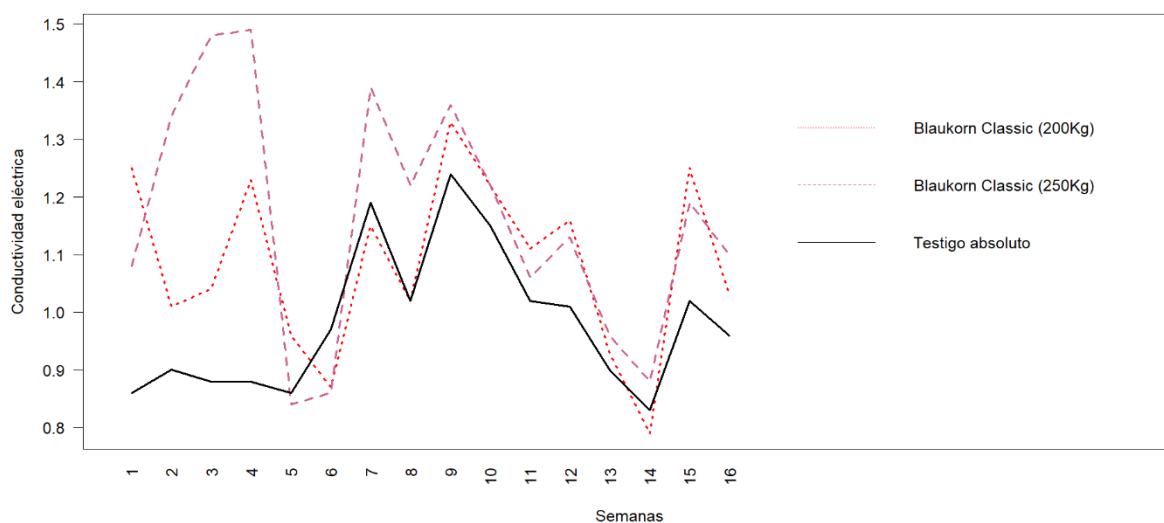


Figura 10. Dinámica temporal y concentración de conductividad eléctrica por efecto de aplicación de diversas fuentes fertilizantes

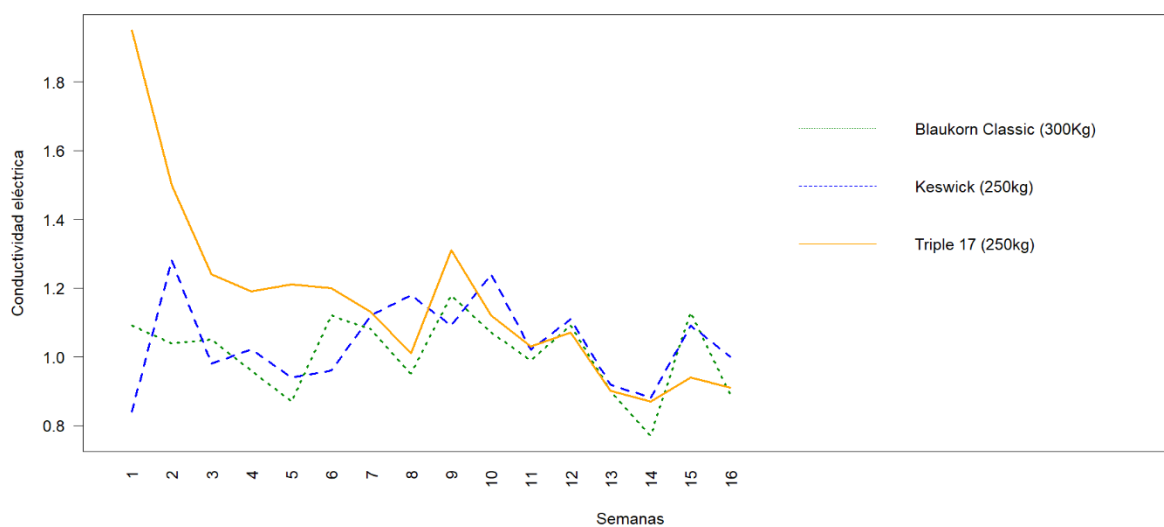


Figura 11. Dinámica temporal y concentración de conductividad eléctrica por efecto de aplicación de diversas fuentes fertilizantes

CONCLUSIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos en el experimento no hubo diferencia para las variables altura de planta, diámetro de tallo, largo y ancho de hoja, esto se debe a que el suelo aportó los requerimientos necesarios para el cultivo esto se confirma con el análisis de suelo y extracto pasta saturada, los elementos que se encontraron en mayor cantidad son los siguientes: nitrógeno, calcio y magnesio, para la respuestas de la variable de calidad de fruto como firmeza si hubo diferencia significativa entre los tratamientos probados, el tratamiento Blaukorn Classic (250Kg) y Keswick (250Kg) obtuvieron mejor respuesta de dicha variable. Respecto a la variable de grados Brix el tratamiento que mostro una mejor respuesta a diferencia de los demás fue el tratamiento Blaukorn Classic (250Kg).

Para la variable de rendimiento no mostro diferencia significativa entre los tratamientos, sin embargo, los tratamientos utilizados mostro un incremento del 6% de fruto con tamaños NFXL y NFL a diferencia del testigo, este incremento a nivel comercial es de suma importancia porque indica que cada planta produjo entre 2 a 3 frutos mas que el testigo, para el caso de numero de frutos de mediano y chico el testigo mostro un 3% mas que el resto de los tratamientos.

Para futuros experimentos relacionados con objetivos similares se recomienda establecer los experimentos en ambientes de suelos desgastados para ver el potencial de los fertilizantes de lenta liberación a probar.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez-Hernández, J. C. (2012). Comportamiento agronómico e incidencia de enfermedades en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) injertadas. *Acta Agronomica* 61(2), 117-125.
- A. Shaviv, Plant response and environmental aspects as affected by rate and pattern of nitrogen release from controlled release N fertilizers, in: *Progress in Nitrogen Cycling Studies*, 1996, pp. 285e291
- Andreetta, H. A. (2003). Fármacos de acción prolongada: mecanismos de liberación. Usos de distintos modelos. *Acta Farmaceutica Bonaerense*, 22(4), 355-364
- Azeem, B., KuShaari, K., Man, Z., 2016. Effect of coating thickness on release characteristics of controlled release urea produced in fluidized bed using waterborne starch biopolymer as coating material. *Procedia Eng.* 148, 282–289. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.615>.
- Barker, A. V., & Pilbeam, D. J. (2007). *Handbook of plant nutrition*. CRC Press.
- Baligar, V. C., & Bennett, O. L. (1986). NPK-fertilizer efficiency—a situation analysis for the tropics. *Fertilizer research*, 10(2), 147-164. doi: 10.1007/BF01074369
- Baligar, V. C., Fageria, N. K., & He, Z. L. (2001). Nutrient use efficiency in plants. *Communications in soil science and plant analysis*, 32(7-8), 921- 950. doi: 10.1081/CSS-100104098
- Bao, X., Yu, L., Simon, G.P., Shen, S., Xie, F., Liu, H., Chen, L., Zhong, L., 2018. Rheokinetics of graft copolymerization of acrylamide in concentrated starch and rheological behaviors and microstructures of reaction products. *Carbohydr. Polym.* 192, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.040>.
- Bárcena-Ibarra, A. (2022). Efectos económicos y financieros en América Latina y el Caribe del conflicto entre la Federación de Rusia y Ucrania. Santiago, Chile: CEPAL.
- Brown, L.F., Fogler, H.S., 2008. *Fluidized bed reactors, diffusion and reaction in porous catalysts*. Professional Reference Shelf, University of Michigan, Ann Arbor, MI.
- Calabi-Floody, M., Medina, J., Rumpel, C., Condrón, L.M., Hernandez, M., Dumont, M., de la Luz Mora, M., 2018. Smart fertilizers as a strategy for sustainable agriculture. *Adv. Agron.* 147, 119–157. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.10.003>.
- Castilla, L. (2005). Evaluación de líneas interespecíficas de arroz (*Oryza* spp.) a la inoculación con las bacterias fijadoras de nitrógeno *Azotobacter chroococcum* y

- Azospirillum amazonense en un typic haplustalf de la meseta de Ibagué. Universidad Nacional de Colombia.
- Choi, M.M., Meisen, A., 1997. Sulfur coating of urea in shallow spouted beds. Chem. Eng. Sci. 52, 1073–1086. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(96\)00377-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(96)00377-6).
- Costa, M.M., Cabral-Albuquerque, E.C., Alves, T.L., Pinto, J.C., Fialho, R.L., 2013. Use of polyhydroxybutyrate and ethyl cellulose for coating of urea granules. J. Agric. Food Chem. 61, 9984–9991. <https://doi.org/10.1021/jf401185y>.
- Cotler, H., Corona, J. A., & Galeana-Pizaña, J. M. (2020). Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: una primera aproximación. Investigaciones geográficas, 101. 2448-7279. doi: 10.14350/rig.59976
- Cabalceta, G., Saldias, M., & Alvarado, A. (2005). ABSORCIÓN DE NUTRIMENTOS EN EL CULTIVAR DE PAPA MNF-801/. AGRONOMÍA COSTARRICENSE.
- Canales-Almendares, J. E., Borrego-Escalante, F., Narvaez-Ortiz, W. A., González-Morales, S., & Benavides-Mendoza, A. (2021). Impacto de diferentes fertilizantes en la solución del suelo y el crecimiento de tomate. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 26, 105-117. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2941>
- Dave, A. M., Mehta, M. H., Aminabhavi, T. M., Kulkarni, A. R., & Soppimath, K. S. (1999). A review on controlled release of nitrogen fertilizers through polymeric membrane devices. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 38(4), 675-711. doi: 10.1080/03602559909351607
- Dave, A. M., Mehta, M. H., Aminabhavi, T. M., Kulkarni, A. R., & Soppimath, K. S. (1999). A review on controlled release of nitrogen fertilizers through polymeric membrane devices. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 38(4), 675-711. doi: 10.1080/03602559909351607
- Devassine, M., Henry, F., Guerin, P., Briand, X., 2002. Coating of fertilizers by degradable polymers. Int. J. Pharm. 242, 399–404. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(02\)00225-9](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(02)00225-9).
- Devassine, M., Henry, F., Guerin, P., Briand, X., 2002. Coating of fertilizers by degradable polymers. Int. J. Pharm. 242, 399–404. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(02\)00225-9](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(02)00225-9).
- Díaz-Vázquez, F. A., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Torres, V., Juárez-Maldonado, A., & García-León, Á. (2023). Influencia de cuatro concentraciones de solución Steiner sobre los nutrientes en la solución del suelo y productividad en tomate (Solanum lycopersicum L.) Influence of four concentrations of Steiner solution on nutrients in

- soil solution and productivity in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). 41(1), 12.
<https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1646>
- Dong, Q., Xian, B., Hong, L., Xing, L., Ling, C., Long, Y., Xiao, Z., Pei, C., 2014. Preparation of cassava starch-based superabsorbent polymer using a twin-roll mixer as reactor. *Chin. J. Polym. Sci.* 32, 1348–1356.
<https://doi.org/10.1007/s10118-014-1516-8>.
- Duan, Q., Jiang, S., Chen, F., Li, Z., Ma, L., Song, Y., ... & Yu, L. (2023). Fabrication, evaluation methodologies and models of slow-release fertilizers: a review. *Industrial Crops and Products*, 192, 116075.
- Duan, Q., Zhu, Z., Chen, Y., Liu, H., Yang, M., Chen, L., Yu, L., 2022. Starch-based foams nucleated and reinforced by polysaccharide-based crystals. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 10, 2169–2179.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c07738>.
- Eghbali Babadi, F., Yunus, R., Abbasi, A., Masoudi Soltani, S., 2019. Response surface method in the optimization of a rotary pan-equipped process for increased efficiency of slow-release coated urea. *Processes* 7, 125.
<https://doi.org/10.3390/pr7030125>.
- Fageria, N. K. (2001). Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, 24(9), 1487-1502. <https://doi.org/10.1081/PLN-100000100>
- FAO. 2019. Portal de suelos de la FAO.
- FAO. (2023). Producción de tomate. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Rawson, M., & Gómez, H. (04 de 02 de 2020). Fao. Obtenido de Fao: <http://www.fao.org/docrep/006/x8234s/x8234s00.htm#Contents>
- Fernández, J. A., Santos, R. G., Guerra, N. B., & Valdés, L. O. (2010). Estudio cinético de liberación in vitro en un biomaterial compuesto por hap200/poviac/caco3. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 10(2), 119-130.
- Fixen, P., Brentrup, F., Bruulsema, T., Garcia, F., Norton, R., & Zingore, S. (2015). Nutrient/fertilizer use efficiency: measurement, current situation and trends. In P. Drechsel, P. Heffer, H. Magen, R. Mikkelsen, & D. Wichelns (Eds). *Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification* (270 p.). FA, IWMI, IPNI, IPI.
- Fry S C, R Smith, K F Renwick, D J Martin, S K Hoolge, K J Matthews (1992) Xyloglucan endotransglycosidase, a new wall-loosening enzyme activity from plants. *Biochem. J.* 282:821-828.

- Geisseler, D., & Scow, K.M. (2014). Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms- A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 75, 54- 63. doi: 10.1016/j.soilbio.2014.03.023
- Gioacchini, P., Ramieri, N. A., Montecchio, D., Marzadori, C., & Ciavatta, C. (2006). Dynamics of Mineral Nitrogen in Soils Treated with Slow-Release Fertilizers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37(1-2), 1-12. <https://doi.org/10.1080/00103620500403002>
- Guo, M., Liu, M., Zhan, F., Wu, L., 2005. Preparation and properties of a slow-release membrane-encapsulated urea fertilizer with superabsorbent and moisture preservation. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, 4206–4211. <https://doi.org/10.1021/ie0489406>
- Guo, M., Liu, M., Zhan, F., Wu, L., 2005. Preparation and properties of a slow-release membrane-encapsulated urea fertilizer with superabsorbent and moisture preservation. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, 4206–4211. <https://doi.org/10.1021/ie0489406>.
- Guertal, E. 2009. Slow-release nitrogen fertilizers in vegetable production: A review. <https://pdfs.semanticscholar.org/5b2a/2b39538bee5ee1b81f322641e54e742edd82.pdf>
- Gutiérrez Castorena, E. V., Gutiérrez Castorena, M., & Ortiz Solorio, C. A. (2015). Manejo integrado de nutrientes en sistemas agrícolas intensivos: revisión. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(1), 201-215.
- Hernández-Díaz, M. I., Chailloux-Laffta, M., Moreno-Placeres, V., Igarza-Sánchez, A., & Ojeda-Veloz, A. (2014). Niveles referenciales de nutrientes en la solución del suelo para el diagnóstico nutricional en el cultivo protegido del tomate. *Idesia*, 32(2), 79-88. <http://doi.org/10.4067/S0718-34292014000200011>
- Hernández-Díaz, M. I., Chailloux-Laffta, M., Moreno-Placeres, V., Igarza-Sánchez, A., & Ojeda-Veloz, A. (2014). Niveles referenciales de nutrientes en la solución del suelo para el diagnóstico nutricional en el cultivo protegido del tomate. *Idesia*, 32(2), 79-88. <http://doi.org/10.4067/S0718-34292014000200011>
- Irfan, S. A., Razali, R., KuShaari, K., Mansor, N., Azeem, B., & Versypt, A. N. F. (2018). A review of mathematical modeling and simulation of controlled-release fertilizers. *Journal of Controlled Release*, 271, 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.12.017>.

- Jia, X., Ma, Z.Y., Zhang, G.X., Hu, J.M., Liu, Z.Y., Wang, H.Y., Zhou, F., 2013. Polydopamine film coated controlled-release multielement compound fertilizer based on mussel-inspired chemistry. *J. Agric. Food Chem.* 61, 2919–2924. <https://doi.org/10.1021/jf3053059>.
- Kim, M. Y., Lee, J. W., Park, D. J., Lee, J. Y., Myung, N. V., Kwon, S. H., & Lee, K. H. (2021). Highly stable potentiometric sensor with reduced graphene oxide aerogel as a solid contact for detection of nitrate and calcium ions. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 897(7), 15553. <http://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115553>
- Kretzschmar, R. (2004). *Química ambiental del suelo: (2ª ed.)*, por DL Sparks. Editores académicos, 2003. *Geoderma*, 121, 154-155.
- Klock-Moore, K. A., & Broschat, T. K. (1999). Differences in bedding plant growth and nitrate loss with a controlled-release fertilizer and two irrigation systems. *HortTechnology*, 9(2), 206-209. doi: 10.21273/HORTTECH.9.2.206
- Lao, M., Jiménez, S., Eymar, E., & Fernández, E. (2004). Nutrient levels of the soil solution obtained by means of suction cups in intensive tomato cultivation. *Phyton*, 73, 29-37.
- Lal, M., Kathpalia, R., Sisodia, R., & Shakya, R. (2018). *Plant Physiology, Development and Metabolism*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1_32
- Llanelar, A., García-Caparrós, P., Contreras, J. I., Segura, M. L., & Lao, M. T. (2019). Spatio-temporal variations in nutrient concentration in soil solution under greenhouse tomato. *Journal of Plant Nutrition* 42(8), 842-852. <http://doi.org/10.1080/01904167.2019.1584219>
- Lee, K., Tremblay, G.H., Levy, E.M., 1993. Bioremediation: application of slow-release fertilizers on low-energy shorelines. *Int. Oil Spill Conf. Proc.* 1993, 449–454. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-1993-1-449>.
- López, A. J. (2006). *Manual de edafología*. Sevilla, España: Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla.
- López Martínez, L. G. (2023). *Desarrollo y producción de un fertilizante orgánico a base de caprinaza de liberación lenta (Doctoral dissertation, Universidad de El Salvador)*.
- Lubkowski, K. (2016). Environmental impact of fertilizer use and slow release of mineral nutrients as a response to this challenge. *Polish Journal of Chemical Technology*, 18(1), 72-79. doi: 10.1515/pjct-2016-0012

- López-Astilleros, O., Vinay Vadillo, J. C., Villegas-Aparicio, Y., López Guerrero, I., & Lozano-Trejo, S. (2020). Dinámica de crecimiento y curvas de extracción de nutrientes de *Pennisetum* sp. (Maralfalfa). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(1), 255-265. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i1.4674>
- Liu G, Zotarelli L, Li Y, Dinkins D, Wang Q, Ozores-Hampton M. 2014. ControlledRelease and Slow-Release Fertilizers as Nutrient Management Tools. <http://edis.ifas.ufl.edu/hs1255>
- Majeed, Z., Mansor, N., Ajab, Z., Man, Z., 2017. Lignin macromolecule's implication in slowing the biodegradability of urea-crosslinked starch films applied as slow-release fertilizer. *Starch-Starke* 69. <https://doi.org/10.1002/star.201600362>.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd Editio). Academic Press-ELSEVIER.
- Majeed, Z., Ramli, N.K., Mansor, N., Man, Z., 2015. A comprehensive review on biodegradable polymers and their blends used in controlled-release fertilizer processes. *Rev. Chem. Eng.* 31. <https://doi.org/10.1515/revce-2014-0021>.
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (1980). Potassium in crop production. *Advances in agronomy*, 33, 59-110. doi: 10.1016/S0065-2113(08)60164-9
- Menacé-Almea, M., Marín-Cuevas, C. V., Alcívar-Vera, D. M., & Herrera-Feijoo, R. J. (2023). Evaluación del rendimiento de abonos orgánicos en el desarrollo vegetativo y producción de la soya (*Glycine max*). *Código Científico Revista de Investigación*, 4(E2), 326-342. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v4/nE2/210>
- Morgan K, Cushman K, Sato S. 2009. Release mechanisms for slow- and controlled-release fertilizers and strategies for their use in vegetable production. Department of Soil and Water Science. <http://horttech.ashspublications.org/content/19/1/10.full>
- Müller, C., et al. (2018). Microbial interactions in the rhizosphere and their role in nutrient cycling. *Soil Biology and Biochemistry*, 123, 133-145. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.05.001>
- Navarro García, G. (2013). *Química agrícola: química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Nichols, M.A., E.F. Fadalán, K.J. Fisher y L.M. Morgan. 1995. The effect of osmotic stress on the yield and quality of tomatoes. *Acta Horticulturae* 379: 105-111.
- Osorio, N. (2012). pH del Suelo y disponibilidad de Nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4), 4-7

- O.C. Bøckman, O. Kaarstad, O.H. Lie, I. Richards, Agriculture and Fertilizers, Norsk Hydro AS, 1990, p. 245.
- Obrador Olán, J. J., Hernández- Sánchez, G., Juárez-López, J. F., Arreola-Enríquez, J., García-López, E., & Castillo-Arias, E. D. L. Á. (2021). Plant quality index of caracolillo (*Ormosia macrocalyx* Ducke), in nursery stage with controlled release fertilizers. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i10.1862>
- Peralta, I. E., & Spooner, D. M. (2007). History, origin and early cultivation of tomato (*Solanaceae*). In M. K. Razdan & A. K. Mattoo (Eds.), *Genetic Improvement of Solanaceous Crops Volume 2: Tomato* (Vol. 2, pp. 1–24). Science Publishers.
- Peacock, C.H., DiPaola, J.M., 1992. Bermudagrass response to reactive layer coated fertilizers. *Agron. J.* 84, 946–950. <https://doi.org/10.2134/agronj1992.00021962008400060007x>
- Puentes-Páramo, Y., & Menjivar-Flores, J. (2014). EFICIENCIAS EN EL USO DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO EN CLONES DE CACAO (*Theobroma cacao* L.).
- Ramli, R.A., 2019. Slow release fertilizer hydrogels: a review. *Polym. Chem.* 10, 6073–6090. <https://doi.org/10.1039/c9py01036j>.
- Sahagún, G., Luisa, M., Martínez Juárez, V., Avendaño López, A. N., Padilla Sahagún, M., & Izquierdo Oviedo, H. (2009). Acción de oligosacáridos en el rendimiento y calidad de tomate. *Revista fitotecnia mexicana*, 32(4), 295-301.
- Salisbury B F, W C Ross (1994) *Fisiología Vegetal*. Grupo Editorial Iberoamericana, S. A. de C. V. México. pp:127-202.
- Salisbury, F. B., & Ross, C. W. (1992). *Fisiología vegetal*. Editorial Iberoamérica.
- Sanderson, K.R., Fillmore, S.A.E., 2012. Slow-release nitrogen fertilizer in carrot production on Prince Edward Island. *Can. J. Plant Sci.* 92, 1223–1228. <https://doi.org/10.4141/cjps2011-201>.
- Sattari, S. Z., Van Ittersum, M.K., Bouwman, A.F., Smit, A.L., & Janssen, B.H. (2014). Crop yield response to soil fertility and N, P, K inputs in different environments: testing and improving the QUEFTS model. *Field Crops Research*, 157, 35-46. doi: 10.1016/j.fcr.2013.12.005
- Shaviv, A. (2005). Environmental friendly nitrogen fertilization. *Science in China Series C: Life Sciences*, 48(2), 937-947. doi: 10.1007/BF03187132
- SIAP. (2023). Panorama Agroalimentario 2022. <https://drive.google.com/file/d/1jVWS4EFKK7HGwQOBpGeljUyaDT8X8lyz/view>

- Soldat, D. J., Petrovic, A. M., & Barlow, J. (2007). Turfgrass response to nitrogen sources with varying nitrogen release rates. In II International Conference on Turfgrass Science and Management for Sports Fields 783 (pp. 453-462).
- Trenkel, M. E. (1993). New challenges for the world fertilizers industry with regard to agriculture. IFA Agro-Economic Committee, Monte Carlo, EE. UU.
- Timilsena, Y. P., Adhikari, R., Casey, P., Muster, T., Gill, H. & Adhikari, B. (2015). Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(6), 1131-1142. Doi: 10.1002/jsfa.6812
- Trenkel, M. E. (2010). Slow-and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. IFA, International fertilizer industry association.
- Valencia M. 2014. Evaluación de la eficacia de fertilizantes de liberación controlada (CRF) en el cultivo de brócoli (*Brassica oleracea* var. *Itálica*).
- Waddell, J., Gupta, S., Moncrief, J., Rosen, C., Steele, D., 2000. Irrigation-and nitrogenmanagement impacts on nitrate leaching under potato. *J. Environ. Qual.* 29, 251–256 <https://doi.org/210.2134/jeq2000.00472425002900010032x>.
- Wang, Y., Liu, M., Ni, B., Xie, L., 2012. κ-carrageenan–sodium alginate beads and superabsorbent coated nitrogen fertilizer with slow-release, water-retention, and anticompaaction properties. *Ind. Eng. Chem. Res.* 51, 1413–1422. <https://doi.org/10.1021/ie2020526>.
- Wu, L., Liu, M., & Liang, R. (2008). Preparation and properties of a doublecoated slow-release NPK compound fertilizer with superabsorbent and water-retention. *Bioresource technology*, 99(3), 547-554. doi: 10.1016/j.biortech.2006.12.027
- Yang, Y.C., Zhang, M., Li, Y., Fan, X.H., Geng, Y.Q., 2012. Improving the quality of polymer-coated urea with recycled plastic, proper additives, and large tablets. *J. Agric. Food Chem.* 60, 11229–11237. <https://doi.org/10.1021/jf302813g>
- Yuan, G. (2014). An organoclay formula for the slow release of soluble compounds. *Applied Clay Science*, 100, 84-87.
- Zhang, C., Li, X., Yan, H., Ullah, I., Zuo, Z., Li, L., & Yu, J. (2020). Effects of irrigation quantity and biochar on soil physical properties, growth characteristics, yield and quality of greenhouse tomato. *Agricultural Water Management*, 241(10), 106263. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106263>.

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