

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



DISEÑO DE COMPUESTO NANOHÍBRIDO (ZEOLITA-NANOHIIDROXIAPATITA)  
PARA DETERMINAR SU CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE NUTRIENTES

Tesis

Que presenta ANGÉLICA MÉNDEZ RAMÍREZ

como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Torreón, Coahuila

Mayo 2024

DISEÑO DE COMPUESTO NANOHÍBRIDO (ZEOLITA-NANOHIIDROXIAPATITA)  
PARA DETERMINAR SU CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE NUTRIENTES

Tesis

Elaborada por ANGÉLICA MÉNDEZ RAMÍREZ como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Producción Agropecuaria con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



---

Dr. Eduardo Arón Flores Hernández  
Asesor Principal



---

Dr. Mario García Carrillo  
Asesor



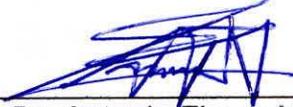
---

Dr. Anselmo González Torres  
Asesor



---

Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno  
Jefe del Departamento de Postgrado



---

Dr. Antonio Flores Naveda  
Subdirector de Postgrado

## **AGRADECIMIENTOS**

Principalmente a Dios por darme vida, salud y una infinidad de oportunidades que me han abierto muchas puertas y me han hecho crecer personalmente.

A mi familia que me ha apoyado siempre en el transcurso de todos estos años, a mis compañeros por compartir las aulas de clases en nuestra preparación académica, a mis profesores por trasmitirme todo su conocimiento y paciencia a lo largo de estos años.

A mis asesores, al Dr. Mario García Carrillo, Dr. Anselmo Gonzales Torres y en especial al Doctor Eduardo Aron Flores Hernández por la oportunidad para trabajar en este proyecto, por su paciencia y conocimiento compartido, para la realización de esta tesis.

A la Química Normal Rangel del lab. De suelos de la UAAAN por su amistad y su apoyo en la elaboración de los análisis para la realización de proyecto, al Doctor Lucio Leos Escobedo por compartirme sus conocimientos y apoyo para la realización de los análisis estadísticos.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia, y Tecnología (CONAHCYT), por el apoyo económico brindado para la realización y culminación de mis estudios de postgrado.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y al posgrado en Producción Agropecuaria por abrirme las puertas y terminar una maestría, una gran oportunidad para mi preparación académica.

## DEDICATORIA

Especialmente a mi madre **Julia Ramírez Cuevas** y mi padre **Adelfo Méndez Juárez** quienes han sido mi motivo para alcanzar cada uno de mis sueños y metas, por el apoyo que siempre me han dado a lo largo de todos mis años de vida, los cuales han sido fundamental para culminar hoy mis estudios de maestría.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIA .....	ii
ÍNDICE DE CUADROS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
2.1 Antecedentes de la nanotecnología.....	4
2.2 Aplicaciones de la nanotecnología .....	4
2.3 La nanotecnología en la Agricultura .....	5
2.4 Antecedentes de la hidroxiapatita.....	7
2.5 Hidroxiapatita en la Agricultura .....	8
2.6 La zeolita y sus aplicaciones .....	8
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	11
3.1 Descripción del área de estudio.....	11
3.2 Adición de Nanohidroxiapatita a zeolita.....	12
3.3 Desarrollo del experimento .....	13
3.4 Análisis de Macronutrientes.....	14
3.4.1 Determinación de Nitrógeno total (Método Kjeldahl).....	14
3.4.2 Determinación de Fosforo (Método Olsen) .....	15
3.4.3 Determinación de Potasio (Método de extracción).....	16
3.4.4 Determinación de Calcio en extracto de saturación .....	17
3.5 Análisis de Micronutrientes (espectrofotometría de absorción atómica).....	17

IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	19
4.1 Nitrógeno .....	19
4.2 Fosforo.....	21
4.3 Potasio.....	22
4.4 Calcio.....	24
4.5 Hierro .....	26
4.6 Cobre .....	27
4.7 Zinc.....	29
4.8 Manganeso .....	30
V. CONCLUSIONES .....	35
VI. RERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	36
VII. ANEXOS .....	42

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Categoría de los nanomateriales .....	5
Cuadro 2 Porcentaje y concentración de los tratamientos utilizados .....	12
Cuadro 3 Acondicionamiento de zeolita con nHAp .....	12
Cuadro 4 Concentración de elementos en fertilizante Bayfolan de Bayer .....	14
Cuadro 5 Cuadro de medias para nitrógeno por la interacción de factores (A*B). UAAAN UL. 2023 .....	19
Cuadro 6 Cuadro de medias para la retención de nitrógeno con base al factor A. UAAAN UL. 2022 .....	20
Cuadro 7 Cuadro de medias para Fosforo por la interacción de factores (A*B). UAAAN UL. 2022 .....	21
Cuadro 8 Cuadro de medias para Potasio por la interacción de factores (A*B). UAAAN UL. 2022 .....	23
Cuadro 9 Cuadro de medias para Calcio por la interacción de factores (A*B). UAAAN UL. 2022 .....	24
Cuadro 10 Cuadro de medias para Hierro por la interacción de factores (A*B). UAAAN UL. 2022 .....	26
Cuadro 11 Cuadro de medias para Cobre por la interacción de factores (A*B). UAAAN UL. 2022 .....	27
Cuadro 12 Cuadro de medias para Zinc por la interacción de factores (A*B). UAAAN UL. 2022 .....	29
Cuadro 13 Cuadro de medias para Manganeso por la interacción de factores (A*B). UAAAN UL. 2022 .....	30

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Movilización, y entrada de nanopartículas en la célula de las plantas Fuente: (Pérez-de-Luque, 2017).....	6
Figura 2 Síntesis de zeolita, a partir de materia prima y sus posteriores aplicaciones (Cao et al., 2023).....	10
Figura 3 localización del experimento UAAAN UL .....	11
Figura 4 Preparación de sustrato y llenado de porómetros .....	13
Figura 5 Aplicación de fertilizante a tratamientos.....	14
Figura 6 Retención de Nitrógeno en sustrato por la interacción de factores (A*B). UAAAN UL. 2023 .....	20
Figura 7 Retención de Nitrógeno con base al factor A. UAAAN UL.2023.....	21
Figura 8 Retención de Fosforo en sustrato por la interacción de factores (A*B). UAAAN UL.2023 .....	22
Figura 9 Retención de Potasio en sustrato por la interacción de factores (A*B). UAAAN UL.2023 .....	24
Figura 10 Retención de Calcio en sustrato por la interacción de factores (A*B). UAAAN UL.2023 .....	25
Figura 11 Retención de Hierro en sustrato por la interacción de factores (A*B). UAAAN UL.2023 .....	27
Figura 12 Retención de Cobre en sustrato por la interacción de factores (A*B). UAAAN UL.2023 .....	29
Figura 13 Retención de Zinc en sustrato por la interacción de factores (A*B). UAAAN UL.2023 .....	30
Figura 14 Retención de Manganeso en sustrato por la interacción de factores (A*B). UAAAN UL.2023 .....	32

## RESUMEN

Diseño de compuesto nanohíbrido (zeolita-nanohidroxiapatita) para determinar su capacidad de retención de nutrientes

Angélica Méndez Ramírez

Para obtener el grado de Maestro en ciencias en Producción Agropecuaria

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dr. Eduardo Aron Flores Hernández

Director de tesis

El incremento en la población mundial, la necesidad de alimentos demanda que el sector agrícola ponga en práctica nuevas tecnologías y practicas más sostenibles para el medio ambiente, es por ello el objetivo de este estudio fue determinar la capacidad de retención de nutrientes en un compuesto nanohíbrido a base de zeolita e hidroxiapatita, utilizando un conjunto de porometros que fueron llenados con diferentes porcentajes de suelo, zeolita-hidroxiapatita, vermiculita, adicionada con una solución nutritiva, los tratamientos fueron analizados en el lab. de suelos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro UL, donde se analizaron los filtrados para detectar macronutrientes y micronutrientes y evaluar la retención. Se probaron 12 tratamientos con cuatro niveles de concentración de Nanohidroxiapatita (1000, 2000, 4000, 0 ppm) y tres diferentes porcentajes de sustrato (suelo, zeolita-nHAp, vermiculita, respectivamente) (50,15,35 %), (50,25,25 %), (50,35,15 %), se evaluó la retención de macronutrientes Nitrógeno, fosforo, calcio, potasio y micronutrientes Cobre, Fierro, Manganeso, Zinc. Los resultados obtenidos demostraron que la combinación de sustratos influyo positivamente en retención de Nitrógeno mostrando alta significancia estadística, mientras que para los demás elementos no se observaron diferencias estadísticas; respecto a la combinación de factores AxB (sustrato)x(concentración de nHap), numéricamente hablando, se incrementó la retención para N 327.39%, P 195.88%, K 939.65%, Ca 167.17%, Fe 156.03%, Cu 204.16%, Zn 151.84% y Mn 152.84% sobre nuestro tratamiento control.

**Palabras clave:** Nanopartículas, Nanocompuesto, Liberación Lenta, Agricultura sustentable, Agronanotecnología.

## **ABSTRACT**

Design of nanohybrid composite (zeolite-nanohydroxyapatite) to determine its nutrient retention capacity

Angélica Méndez Ramírez

Para obtener el grado de Maestro en ciencias en Producción Agropecuaria

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dr. Eduardo Aron Flores Hernández

Director de tesis

The increase in the world population, the need for food demands that the agricultural sector implement new technologies and more sustainable practices for the environment, that is why the objective of this study was to determine the nutrient retention capacity of a nanohybrid composite based on zeolite and hydroxyapatite, using a set of porometers that were filled with different percentages of soil, zeolite-hydroxyapatite, vermiculite, added with a nutrient solution, the treatments were analyzed in the lab. The treatments were analyzed at the soil laboratory of the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro UL, where the filtrates were analyzed for macronutrients and micronutrients and retention was evaluated. Twelve treatments were tested with four concentration levels of Nanohydroxyapatite (1000, 2000, 4000, 0 ppm) and three different percentages of substrate (soil, zeolite-nHAp, vermiculite, respectively) (50,15,35 %), (50,25,25 %), (50,35,15 %), the retention of macronutrients Nitrogen, phosphorus, calcium, potassium and micronutrients Copper, Iron, Manganese, Zinc was evaluated. The results obtained showed that the combination of substrates positively influenced nitrogen retention showing high statistical significance, while for the other elements no statistical differences were observed; with respect to the combination of factors AxB (substrate)x(nHAp concentration), numerically speaking, retention increased for N 327.39%, P 195.88%, K 939.65%, Ca 167.17%, Fe 156.03%, Cu 204.16%, Zn 151.84% and Mn 152.84% over our control treatment.

**Keywords:** Nanoparticles, Nanocomposite, Slow release, Sustainable agriculture, Agronanotechnology.

## I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la (FAO, 2009) la población estimada para el año 2050 será de casi nueve mil cien millones de habitantes. Este aumento de la población mundial en un futuro y el cambio climático, aumentará de manera considerable la demanda de alimentos y será necesario intensificar la producción agrícola haciéndola de forma sostenible y menos dañina con el medio ambiente, todo esto debido a la erosión y baja fertilidad de los suelos, estrés abiótico y las plagas (Timmusk, Behers, Muthoni, Muraya, & Aronsson, 2017) (Ul-Haq, Ijaz, & Khan, 2020).

El cambio climático global y las actividades humanas han ocasionado daños a los ecosistemas, generando una crisis ambiental y ecológica que se manifiesta en magnitudes globales, regionales y locales (Gavito et al., 2017).

El impacto que generan en el planeta nuestros procesos de consumo, como la elaboración de alimentos presentan del 21% al 37% de gases efecto invernadero de estos gran parte del CO<sub>2</sub> (60%) lo genera la producción de energía con la generación de combustibles fósiles (Svatetz, 2023) es por ello que se ha fomentado el cambio de los hábitos, la utilización de nuevas tecnologías de gran parte de la población mundial, impulsando al estudio y experimentación de nuevos materiales que nos ayuden a disminuir y racionalizar los usos de agroquímicos que están dañando a nuestro planeta y afectando la agricultura mundial (Sánchez Castañeda, 2017).

La magnitud de los retos ambientales a los que hacemos frente hoy en día requiere la participación de una diversidad de partes interesadas y colaboradores para desarrollar prácticas de sostenibilidad social, cultural y económicamente sólidas; y evitar la disminución de la producción (Beaudoin et al., 2022). Junto a estos considerables problemas medioambientales, existen secuelas poco saludables para la salud gracias a la calidad inferior del agua, el aire y el suelo (Castro Campos, 2022).

La agricultura es de los principales sectores de auge y crecimiento económico de países en desarrollo, dentro de los que destaca México; es por ellos es importante mencionar que en el sector agrícola, gran parte de los cultivos son demasiado necesitados en lo que se refiere a la necesidad de fertilizantes en las diferentes

etapas del cultivo (Nehra, Saharan, & Choudhary, 2016) es por ello que cada día se reportan más pruebas de la utilización constante y desmedida de fertilizantes, provocan procesos negativos y perjudiciales en los agroecosistemas, como el lavado y lixiviado de nitratos, daños de mantos acuíferos y subsuelo, así como emisión gaseosa, que provoca daños al medio natural y con peligros altos para la salud (Moreno Reséndez, García Mendoza, Reyes Carrillo, Vásquez Arroyo, & Cano Ríos, 2018).

Los fertilizantes minerales forman parte importante en la escasez y reposición de nutrientes en el suelo los cuales son fundamentales para la producción y calidad de los alimentos, es por ello la demanda de fertilizantes en 2016 fue de más de 105 millones de toneladas, y para el año 2022 la demanda mundial ascendió a los 112 millones de toneladas (FAO, 2019) por ello es necesaria la reducción y optimización a la hora de fertilizar permitiendo aprovechar al máximo tanto la calidad como la cantidad y obtener mejores rendimientos, mejorando precios de producir y mitigar el daño a nuestro medio ambiente (Lu & Tian, 2017).

Diversos adelantos tecnológicos sobre las nano ciencias y las nano tecnologías (NT), tanto el aumento de uso de nano materiales en una variedad de productos de uso y consumo, han logrado utilizar soluciones concretas para el cuidado del medio ambiente (Tutor-Sánchez, 2018); de este modo ha surgido un interés en diferentes sectores de la sociedad por adoptar esta tecnología (Nair et al., 2010).

Existe diversidad de nanopartículas que han sido testeadas en producción agropecuaria, como las NPs metálicas, con resultados positivos comprobados en rendimiento de diversos cultivos, como las NPs de ZnO que adicionadas a semillas de mijo comprobaron un aumento de la germinación en un 20% y un 51% el índice de vigor (Kumar, Dadhich, Dhiman, Sharma, & Sharma, 2024), estudios realizados en el cultivo de zanahoria utilizando NPs de TiO<sub>2</sub> por medio de fertilización pulverizada mejoró el crecimiento vegetativo, rendimiento de raíces y calidad del fruto (Upadhyay, Goyal, Maji, Dwivedi, & Pandey, 2023), así como la utilización de Nps de Ag/AgCl utilizadas como tratamiento en la germinación de semillas de soja demostró resistencia a las dosis aplicadas y la germinación no se vio

afectada (Spagnoletti, Spedalieri, Kronberg, & Giacometti, 2019), entre las Nps utilizadas en la producción agropecuaria destaca una que no es metálica sino cerámica, con diversas propiedades como, biocompatible, no tóxica, osteoconductor y bioactivo (Demirchan & Gshalaev, 2012), que su uso principal ha sido en medicina por su capacidad para regenerar hueso (Pujari-Palmer, Lu, & Ott, 2017), sin embargo, científicos del área agropecuaria han puesto de manifiesto su posible incorporación como fertilizante (Rop, Mbui, Karuku, Michira, & Njomo, 2020) por su contenido de fósforo y calcio, elementos esenciales en la vida de las plantas (Xiong, Wang, Hunter, & Kopittke, 2018).

Por lo tanto, se requieren más investigaciones sobre la Nanohidroxiapatita en la agricultura, adicionada al suelo para determinar sus posibles efectos positivos y los diferentes beneficios que esto nos da; todo este trabajo tiene como objetivo la utilización de los recursos de los cuales disponemos, como la implementación de nuevas tecnologías, mediante la determinación de la disposición de retener los nutrientes en el suelo utilizando un compuesto nanohíbrido a base de Zeolita-Hidroxiapatita.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Antecedentes de la nanotecnología

Diversas instituciones se han interesado en formar la definición adecuada de “nanotecnología” (NT), uno es la iniciativa Nacional de NT de los Estados Unidos (NNI) esta define NT como “el conocimiento y el control de la materia en dimensiones aproximadamente 1 y 100 nanómetros (nm) (NNI, 2013); La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) cataloga a la NT como “conjunto de tecnología que logran el estudio, explotación o manipulación, de pequeños sistemas y estructuras” (OECD, 2013).

La nanotecnología no es resultado de la manipulación humana su historia nos lleva a tiempos remotos; a las nanopartículas de origen natural que incluyen compuestos orgánicos (proteínas, polisacáridos, virus, entre otros) e inorgánicos (oxihidroxidos de hierro, aluminosilicatos, metales, etc.) los cuales se producen por meteorización, erupciones volcánicas, incendios forestales o procesos microbianos (Heiligtag & Niederberger, 2013). En estudios anteriores las nanopartículas de carbono han sido utilizadas para el fortalecimiento de neumáticos, las proteínas en escala nano para las vacunas así como en la naturaleza la fotosíntesis es considerada actualmente una forma de NT (Ashby, Ferreira, & Schodek, 2009).

### 2.2 Aplicaciones de la nanotecnología

La NT y el crecimiento de nanomateriales son oportunidades de desarrollo y estudio que a lo largo de los últimos años han presentado un auge; de las diversas ramas de la NT la elaboración y uso de nano partículas (NP) es una de las más activas estas son partículas de 10-100 nanómetros de medida y en ciertas ocasiones pueden ser de hasta 1000 nanómetros (Dahoumane, Jeffryes, Mechouet, & Agathos, 2017) La NT ha demostrado que las estructuras a esta escala mejoran sus propiedades funcionales, la utilización de los mismos en escala nano (<1000 nm) mejoran la eficiencia en cuanto a absorción, disponibilidad y solubilidad (Luna-Herrera, Pérez-Martínez, Barradas-Hernández, & Zenteno-Cuevas, 2021).

El desarrollo de la NT abarca ampliamente su uso en antimicrobianos, biosensores, nanomedicina, tecnología nanoelectrónica, refuerzo, tratamientos de agua y la aplicación a la agronomía (Zhang, 2020). Estas áreas de estudio se han incrementado debido a las tendencias más preocupantes y cambiantes en el mundo actual como son el agotamiento de los recursos, los altos niveles del mar y el adelgazamiento en la capa de ozono, son cuales ponen en peligro la supervivencia de las futuras generaciones (A. Kumar et al., 2024).

En función de la naturaleza de su material, los nanomateriales se clasifican en cuatro categorías, cuadro 1 (Pandey & Jain, 2020).

Cuadro 1 Categoría de los nanomateriales

SN	Base material	Ejemplo
i	Bio-orgánico	Dendrímeros, micelas, liposomas
ii	Carbono	Carbono nanotubos, fulleres, carbono nanofibras, negro de humo.
iii	Metal y metal A base de óxido	Ag, Au, Ti, Fe, Pt, Pd, Sn, Cu nanomateriales
iv	Basado en compuesto	Polímero, compuesto combinaciones de NMd a base de carbono, base de metal, o bases orgánicos con cualquier forma de materiales a granel metálicos, cerámicos o poliméricos.

### **2.3 La nanotecnología en la Agricultura**

Para explicar las utilidades de la NT en la agricultura es fundamental primero conocer el funcionamiento de las plantas: absorción, captan y movilizan las nano partículas, así también como interactúan con la célula vegetal (figura 1); una vez que los nutrientes entran en la planta se mueven a lo largo de los tejidos: el apoplasto y simplasto, esta ruta también las siguen las NP, el transporte apoplasto lo hace fuera de la membrana plasmática entre los vacíos extracelulares y los vasos del xilema, y el simplasto en medio del el citoplasma de las células adyacentes dentro de los plasmodesmos y placas de tamiz; la forma de aplicación, las

características de las nanopartículas y las especies vegetales influyen en la eficacia y su destino final (Pérez-de-Luque, 2017).

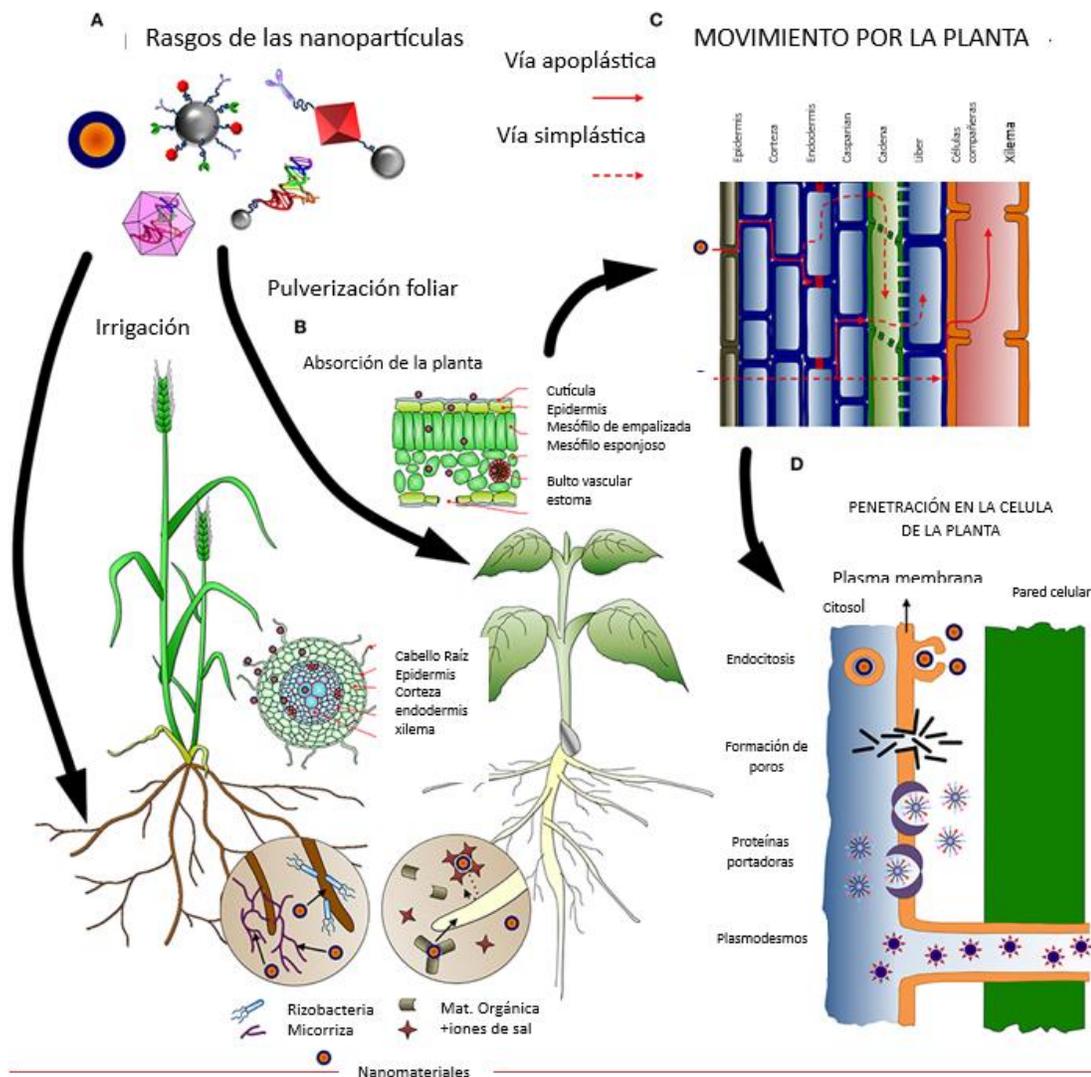


Figura 1 Movilización y entrada de nano partículas en la célula de las plantas Fuente: (Pérez-de-Luque, 2017).

La NT ofrece para la agricultura un máximo potencial para adecuar la creación de fertilizantes o diferentes composiciones químicas deseadas, la NT también ayuda a mejorar la eficiencia de los nutrientes mediante la liberación controlada lo que ayuda a reducir el impacto ambiental (Raliya, Saharañ, Dimkpa, Biswas, & chemistry, 2017). En los últimos años han puesto interés en la utilización de nanopartículas de fosfato cálcico amorfo, ya que este presenta un potencial como nano fertilizante por

su eficiencia de uso de nutrientes superior a los fertilizantes convencionales (Carmona, Guagliardi, & Masciocchi, 2022). Entre las áreas de interés también destaca la resistencia antimicrobiana (RAM) en la cual se han utilizado las nanopartículas de óxidos metálicos (MeONP) entre las que se han sintetizado y probado se encuentran las siguientes ( $\text{Ti}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Ag}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  y  $\text{CaO}$ ) con las que se han hecho aplicaciones en la lucha de fitopatógenos, además de que han comprobado el desarrollo y eficiencia de los cultivos (Bhattacharjee et al., 2022). Un estudio realizado en semillas de *Brassica juncea* utilizando nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  demostró que aumento dos rasgos de importancia económica como lo es la longitud de silicuas y el número de semillas por silicua (Dhingra et al., 2022). En el presente se han evolucionado los nanomateriales novedosos que deben poseer funcionalidad y rentabilidad y demostrar seguridad y sostenibilidad con rápidos avances en este campo. Para la ejecución de los "Objetivos de la agenda 2030" establecidos por la Organización de las Naciones Unidas, los nanomateriales son una perspectiva con mucho futuro para la protección del medio ambiente y para las necesidades y las demandas de la sociedad de una manera más sostenible (Mondal, Sabuj, Habib, & Rahman, 2024).

#### **2.4 Antecedentes de la hidroxiapatita**

La Hidroxiapatita (HA) es un biocristal compuesto de calcio, fósforo e hidrógeno esta de manera natural y lo podemos encontrar en los dientes y huesos del cuerpo humano, (Mesa-Ospina & Escobar-Sierra, 2019) por lo cual ha sido utilizado principalmente para la aplicación médica y odontológica; la excelente capacidad de intercambio iónico de la hidroxiapatita ha propiciado que se sea utilizada para controlar parámetros medioambientales y en la agricultura (Oshida, 2015).

En las últimas 4 décadas la Hidroxiapatita ha demostrado ser un biomaterial fundamental en el uso de reconstrucción y reparaciones óseas, hoy en día es el más utilizado en cirugía clínica (Demirchan & Gshalaev, 2012).

## **2.5 Hidroxiapatita en la Agricultura**

En un estudio realizado utilizando una combinación de urea-hidroxiapatita adicionada con nanotubos de carbono mediante inmersión se comprobó que las muestras adicionadas retuvieron la urea durante más tiempo, liberando del 76 al 90% en los primeros 150 minutos mientras que las muestras control se liberó entre 70 a 80% en los primeros 50 minutos; lo cual reduce la emisión de amoníaco al medio ambiente y mejora la eficiencia del uso de nutrientes a las plantas (Haruna, Oladapo, Kolawole, Scholastica, & Muhammad, 2024).

En el cultivo Maíz el uso de nanopartículas de Hidroxiapatita-urea adicionadas con zinc incorporadas como recubrimiento de semillas, mejoró el desarrollo de las plantas, la eficiencia y el contenido de nutrientes en raíces y brotes de las plantas demostrando los efectos positivos de estas nuevas tecnologías (Abeywardana, Sandaruwan, Chathurika, Karunaratne, & Kottegoda, 2023).

En un estudio en cultivo de vid el uso de iones de Cu e Hidroxiapatita para el control del patógeno de la vid *P. vitícola*, se demostró que la Hidroxiapatita sintética potencio la actividad biológica de los iones Cu; reduciendo la incidencia de la enfermedad y la persistencia bajo efecto de lavado por lluvia en todas las condiciones experimentales (Battiston, Antonielli, Di Marco, Fontaine, & Mugnai, 2019).

## **2.6 La zeolita y sus aplicaciones**

La zeolita es un material cristalino de aluminosilicatos y microporoso con unidades primarias tetraédricas de  $TO_4$  (donde T es un átomo tetraédrico como Si, Al, Zn); sus estructuras cristalinas le dan propiedades características únicas como su gran estabilidad (hidrotérmica) y sus estructuras aniónicas, todo esto la hace indispensable para varias industrias que las utilizan como adsorbentes, intercambiadores de iones y catalizadores (Natsume et al., 2018). Las zeolitas cristalinas tienen microporos de 0,4-1,2 nm y estas se consideran los catalizadores más utilizados en procesos industriales de refinado de petróleo, industria química

energética y protección al medio ambiente esto debido a su estabilidad térmica e hidrotérmica y capacidad de adsorción (Luan, Wu, Wu, Meng, & Xiao, 2024).

Se clasifican alrededor de 140 diversas clases de zeolitas naturales y 150 sintéticas las cuales son de usos específicos; entre los diversos usos en la industria destaca el área médica donde se involucra en los mecanismos de captura de iones, desintoxicación y moléculas en los agujeros; la clinoptilolita es la zeolita más utilizada en la industria médica (Laurino & Palmieri, 2015). Estudios en el área agronómica han producido zeolita mediante síntesis hidrotérmica a partir de latas de aluminio y cascara de maíz de Guinea ambos residuos, esta mostró buena capacidad de intercambio catiónico, la relación Si/Al que se requería, estabilidad térmica deseable y buena morfología, además de ser una preparación sostenible y de bajo costo que ayuda a la gestión de residuos (Bello, Abdus-Salam, Adekola, Oyewumi-Musa, & Pal, 2024). Un estudio realizado en la producción de *cucúrbita pepo*, utilizando zeolita, se encontró que este material incrementa de forma significativa la producción de la calabacita con acolchado y sin acolchado, reportando mayor tasa fotosintética, incremento en el número de flores, biomasa seca, rendimiento y calidad del fruto (Lira-Saldivar et al., 2017). La producción de zeolita de síntesis ha ido en aumento debido al rápido desarrollo de la industrialización y urbanización; el exceso de residuos sólidos industriales y agrícolas los cuales contienen silicio y aluminio necesarios para la síntesis de zeolitas que han sido aplicadas en aguas residuales, gases residuales y agricultura (figura 2) (Cao, Xuan, Yan, & Wang, 2023). La zeolita presenta un gran potencial en la agricultura sustentable, ya que mejora considerablemente la estructura y calidad del suelo, incrementa la eficiencia de los agroinsumos actuando como transportadoras de diferentes sustancias activas (Méndez-Argüello & Lira Saldivar, 2019).

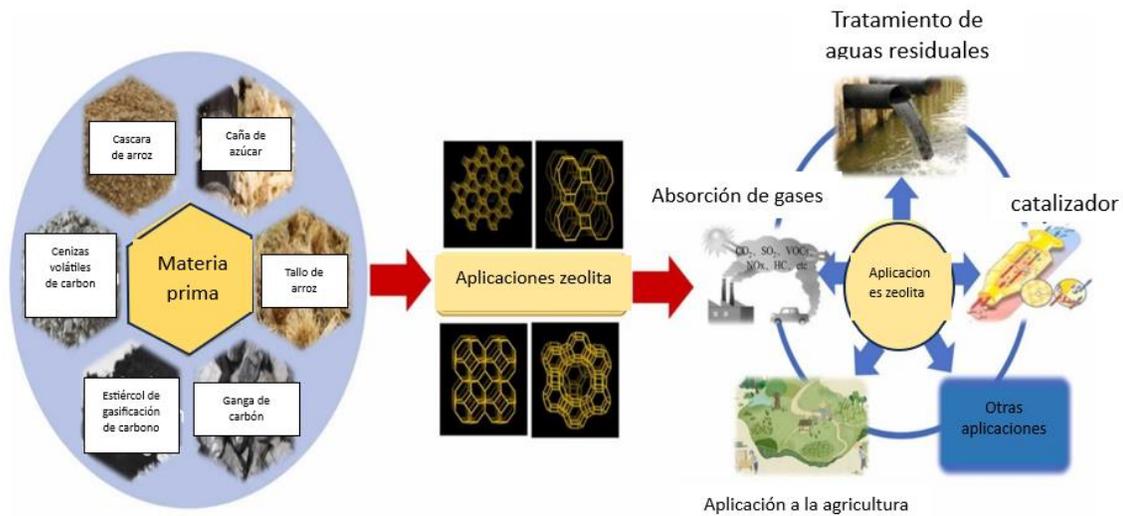


Figura 2 Síntesis de zeolita, a partir de materia prima y sus posteriores aplicaciones (Cao et al., 2023).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Descripción del área de estudio

El experimento se realizó en el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna en Torreón, Coahuila ( $101^{\circ} 40'$  y  $104^{\circ} 45'$  O y  $25^{\circ} 05'$  y  $26^{\circ} 54'$  N); la región cuenta con una altitud de 1,139 msnm, una temperatura media anual de  $18.6^{\circ}\text{C}$ , con una precipitación anual de 235 mm en verano, el clima puede ser cálido-seco y en invierno semifrío a frío (Schmidt, 1989).



Figura 3 Ubicación del experimento UAAAN UL

El experimento fue en el periodo de agosto-diciembre 2022 donde nuestra unidad experimental fueron porometros que fueron elaborados con tubos de plástico PVC, los porometros tienen una altura aproximada de 30 centímetros, estos cuentan en la parte inferior para drenar el filtrado un orificio de la solución nutritiva aplicada, para evitar derrames este orificio cuenta con un tapón. Se realizaron 12 tratamientos con tres repeticiones cada uno con diferentes porcentajes de sustrato y diferentes concentraciones de nanohidroxiapatita los cuales se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 2 Porcentaje y concentración de los tratamientos utilizados

TRATAMIENTO	SUELO %	ZEOLITA %	VERMICULITA %	nHap Ppm
T1	50	15	35	0
T2	50	15	35	1000
T3	50	15	35	2000
T4	50	15	35	4000
T5	50	25	25	0
T6	50	25	25	1000
T7	50	25	25	2000
T8	50	25	25	4000
T9	50	35	15	0
T10	50	35	15	1000
T11	50	35	15	2000
T12	50	35	15	4000

### 3.2 Adición de Nanohidroxiapatita a zeolita

Para la adición de nHap en la zeolita (2.38-4.7 mm) cuadro 3 se utilizaron las siguientes concentraciones se tomó como base un litro de agua para dilución de la Nanohidroxiapatita.

Cuadro 3 Acondicionamiento de zeolita con nHAp

Soluto mL de nHAp	Solvente L de zeolita	Concentración Ppm
4	3	1000
8	3	2000
16	3	4000

### 3.3 Desarrollo del experimento

Para iniciar el experimento se recolecto suelo del area experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro UL el cual se utilizó para para elaborar el sustrato que va dentro de los porometros, posteriormente se realizó un análisis de suelo en el laboratorio de la misma universidad para conocer las condiciones del suelo que se utilizó. Los porcentajes para la elaboración del sustrato se detallan en el cuadro 2 para cada uno de los porometros.



Figura 4 Preparación de sustrato y llenado de porometros

Una vez llenos los porometros con sustrato se realizó la aplicación de una solución nutritiva a base de fertilizante comercial Bayfolan de Bayer, se disolvieron 10 g de fertilizante en un litro de agua destilada y se agregó a cada porometro 800 ml de la solución, después de eso se dejó reposar por 24 horas y al día siguiente se hizo la recolección del filtrado en botes esterilizados y etiquetados se llevaron al laboratorio de suelos de la UAAAN UL donde se realizaron análisis de macronutrientes Nitrógeno, potasio, calcio, fosforo y micronutrientes Cobre, Fierro, Manganeso, zinc. Para determinar la retención de nutrientes.



Figura 5 Aplicación de fertilizante a tratamientos

### 3.4 Análisis de Macronutrientes

#### 3.4.1 Determinación de Nitrógeno total (Método Kjeldahl)

Se realizaron los siguientes análisis en laboratorio para cada uno de los tratamientos con sus repeticiones; se determinó Nitrógeno total (N) por el método Kjeldahl (Kjeldahl, 1883). El cual consiste en lo siguiente:

Para comenzar con la determinación de este elemento, utilizamos 5 ml de nuestra muestra posterior a ello utilizamos 1 g de ácido salicílico, el cual pusimos junto a 35 ml de ácido sulfúrico, y esperamos media hora, después colocamos 15.69 g de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  seguido de 7.8 g  $\text{CuSO}_4$ .

Una vez teniendo esta mezcla comienza la digestión, la mezcla tiene que tomar un color verde claro, una vez a temperatura ambiente agregamos 300 ml de agua destilada.

En un matraz de 500 ml pusimos 50 ml de agua destilada, y 10 ml de HCl además pusimos 4 gotas de rojo de metilo, se puso a destilar, seguido de poner al matraz kjeldal 100 ml de NaOH 45%, una vez pasado el proceso de destilación esperamos obtener 200 ml de este.

El paso final fue la titulación con hidróxido de sodio; de tener un tono rojizo conseguimos pasar a un tono verde claro, y se tomaron lecturas de los ml utilizados para la titulación y con ello se realizaron los siguientes cálculos:

$$\% N \text{ total} = \frac{[(ml \text{ NaOH testigo}) - (ml \text{ NaOH muestra})] \times N \times 0.014 \times 100}{ml \text{ de muestra}}$$

### 3.4.2 Determinación de Fosforo (Método Olsen)

Se determino Fosforo (P) por el método del Olsen ((Olsen & Sommers, 1982) para cada uno de los tratamientos y sus repeticiones, para ello se prepararon los siguientes reactivos:



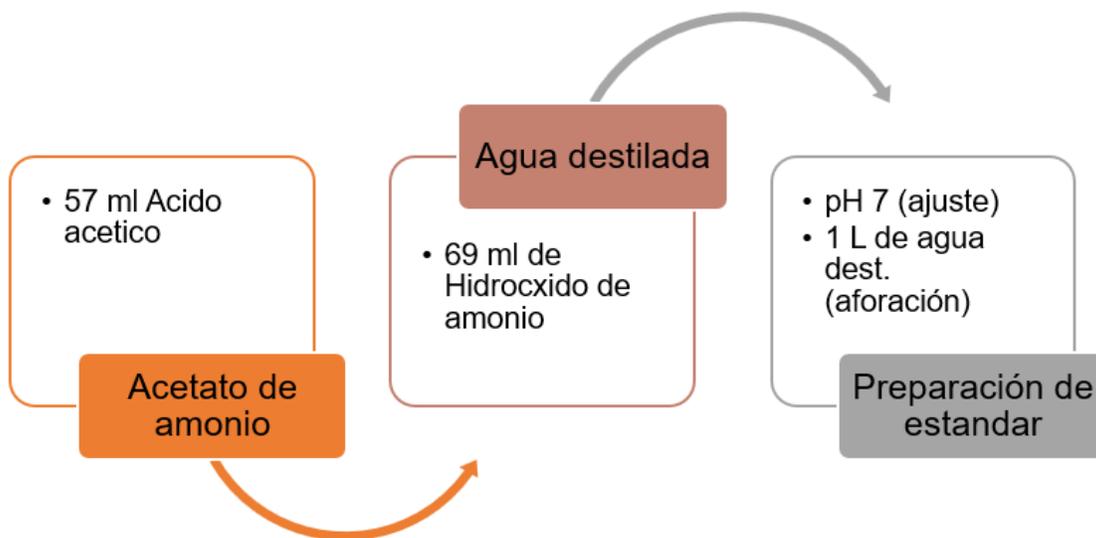
Para la determinación utilizamos matraces Erlenmeyer donde pusimos 2.5 ml de nuestros tratamientos, posteriormente los tapamos con papel y colocamos 50 ml de solución extrac, después se colocaron en el agitador a 180 oscilaciones por minuto por 30 minutos, pasado ese tiempo, se pusieron a filtrar.

En tubos de afloración pusimos nuestro filtrado (5 ml) agregamos junto con reac. B (4ml) y llenamos con agua destilada, tapamos y movimos cuidadosamente para mezclar las sustancias.

Esperamos media hora y se tomó lectura en un aparato de absorbancia el cual estaba calibrado a 882 nm. Esto se realizó con cada una de las muestras

### 3.4.3 Determinación de Potasio (Método de extracción)

Se analizó Potasio (K) en cada uno de los tratamientos por el método de extracción de  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  1N PH 7 (Chapman, 1965). Se preparó lo siguiente:



Para determinar potasio utilizamos 5 ml de nuestros tratamientos (muestras) y en m. Erlenmeyer colocamos  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , se cubrieron con papel y los pasamos a agitador 10 min a 180 oscilaciones por minuto.

Después con una pipeta volumétrica, utilizamos 1 ml de cada Erlenmeyer, los cuales aforamos a 100 ml esto se realizó agregando agua destilada, se agitaron con cuidado y se tomaron las lecturas.

Al finalizar se realizaron los siguientes cálculos para cada de una de las muestras.

$$K \text{ meq}/100 \text{ g} = \frac{[\text{ppm CC} * \text{DM} * \text{DV} * 100]}{39.1 \times 1000 \times 5}$$

### 3.4.4 Determinación de Calcio en extracto de saturación

Se preparó una pasta, de nuestro suelo, mojándola y moviendo constantemente para lograr una pasta uniforme, sin grumos, la cual debemos dejar reposar dependiendo como se vaya tornando, este proceso nos tomó una hora para lograr la condición deseada.

La cantidad de suelo utilizada requerida para esto fue de 200 gr la cual fue suficiente para lograr el extracto, fue necesario anotar la cantidad de suelo y el volumen de agua empleado para saturarlo.

Ya saturada la muestra de suelo dejamos aproximadamente un día, después de este tiempo se puso en un embudo, pero en la parte inferior colocamos papel para evitar arrastre de partículas del suelo, seguido de esto se aplicó vacío.

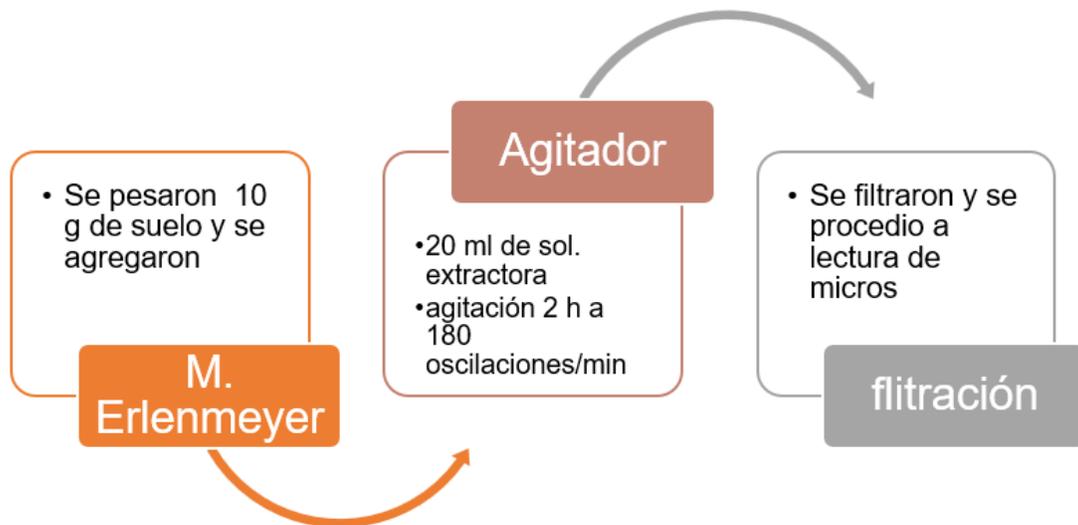
Se determinó el extracto resultante de la pasta de suelo a saturación el calcio mediante titulación:

Se utilizó para matraz y se colocó 5 ml de nuestras muestras y después se agregó agua destilada (5ml), 5 gotas de dietilditiocarbamato de sodio al 1%, 5 gotas de NaOH 4 N, una pizca de murexida y se agito durante un minuto, seguido de esto pasamos a titulación con EDTA esta estuvo lista en cuanto cambio de tono rosa a morado brillante se tomó lectura de los ml utilizados para el cambio y se realizaron los cálculos:

$$\text{Meq/lto Ca} = \frac{\text{ml EDTA} * \text{N} * 1000}{\text{ml. muestra}}$$

### 3.5 Análisis de Micronutrientes (espectrofotometría de absorción atómica)

Para los análisis de micronutrientes Manganese, Hierro, zinc, Cobre, se determinaron mediante espectrofotometría de absorción atómica (Lindsay & Norvell, 1978).



Se determinaron mediante espectrofotometría de Abs. Atómica, se utilizó la llama  $C_2H_2$ . Después de las lecturas procedimos a realizar los cálculos de cada una de las muestras.

$$\text{Micronutrientes (mg/kg)} = \text{ppm curva de cal.} * D. \text{ en masa} * D. \text{ vol. aforado}$$

### Diseño experimental

El diseño experimental utilizado en este experimento de investigación fue en factorial con (3 x 4) donde el factor A está integrado por tres sustratos, mientras que el factor B está conformado por cuatro concentraciones de nanohidroxiapatita; obteniendo 12 tratamientos con tres repeticiones en cada tratamiento generando 36 unidades experimentales. Los datos obtenidos de retención de nutrientes fueron sometidos a un ANOVA y para la comparación de medias con prueba de Tukey (nivel de significancia de 5%) ( $\alpha=0.05$ ), utilizando el programa estadísticos SAS en su versión 9.4.

## IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Nitrógeno

Los resultados descritos en el siguiente estudio en el análisis de varianza para determinar la retención de Nitrógeno; el compuesto nano híbrido muestran que no presentó diferencias estadísticas significativas al 0.05 con una prueba de medias de Tukey en la interacción del factor AxB entre los tratamientos evaluados sin embargo si presento diferencias numéricas donde el tratamiento 1 (35% zeolita- 15% vermiculita) (0 ppm nHap) presentó la media más baja (0.7370% de N) y el tratamiento 12 (35% zeolita- 15% vermiculita) (4000 ppm nHap) presenta la media más alta (2.3980% de N) (figura 6).

Para el factor A (sustrato) (35% zeolita+nHap) (15% vermiculita) presento alta diferencia estadísticas significativa con la media más alta de 2.0655% de N y la combinación (15% zeolita+nHap- 35% vermiculita) presentó la media general más baja con un valor de 1.069% de N; demostrando que la combinación (15%-35%) retuvo la mayor cantidad de Nitrógeno en el sustrato (cuadro 6)

Cuadro 4 Cuadro de medias para nitrógeno por la interacción de factores (A\*B).  
UAAAN UL. 2023

Tratamiento		Valor de la media	Significancia
(%zeolita -%vermiculita) (nHap ppm)			
T12	(35-15) (4000)	2.3980	a
T11	(35-15) (2000)	2.0691	a
T9	(35-15) (0)	2.0641	a
T8	(25-25) (4000)	1.7329	a
T10	(35-15) (1000)	1.7308	a
T6	(25-25) (1000)	1.7301	a

T3	(15-35) (2000)	1.4036	a
T5	(25-25) (0)	1.3977	a
T7	(25-25) (2000)	1.3962	a
T2	(15-35) (1000)	1.0703	a
T4	(15-35) (4000)	1.0655	a
T1	(15-35) (0)	0.7370	a

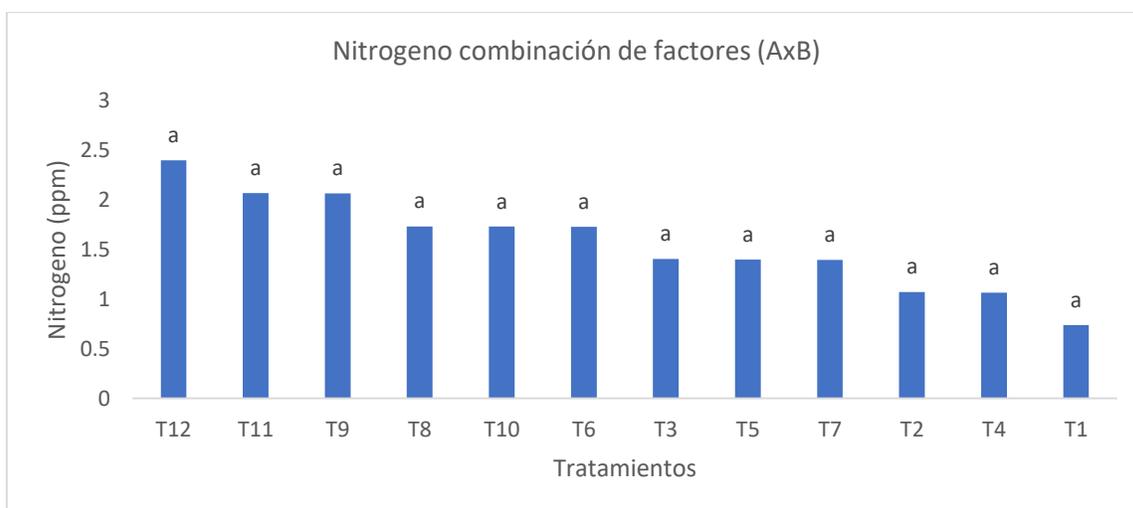


Figura 6 Retención de Nitrógeno en sustrato por la interacción de factores (A\*B).  
UAAAN UL. 2023

Cuadro 5 Cuadro de medias para la retención de nitrógeno con base al factor A.  
UAAAN UL. 2022

Factor A	Valor de la media	Significancia
Sustrato (zeolita+nHap 35% - vermiculita 15%)	2.0655	a
Sustrato (zeolita+nHap 25% - vermiculita 25%)	1.5642	ab
Sustrato (zeolita+nHap 15% - vermiculita 35%)	1.0691	b

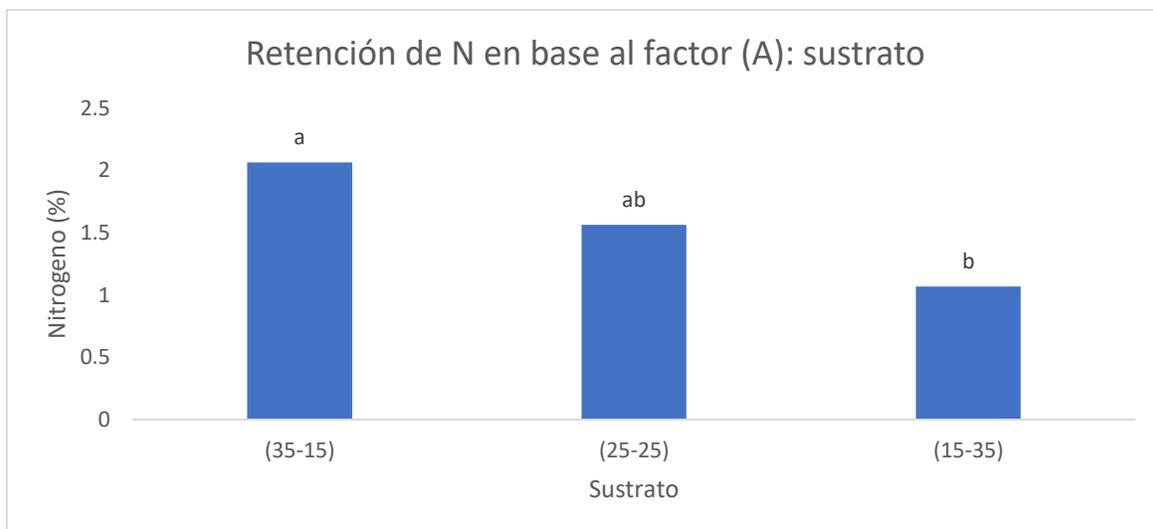


Figura 7 Retención de Nitrógeno con base al factor A. UAAAN UL.2023

#### 4.2 Fosforo

En esta variable analizada el análisis de varianza (Anexo2) no hubo significancia estadística al 0.05 con prueba de Tukey, tanto para el factor A (sustrato), el factor B (concentración de nHap) y la interacción.

En la interacción de los factores AxB el tratamiento 12 (35% zeolita-15% vermiculita) (4000 ppm nHap) numéricamente presento la media más alta (4.769 ppm de P), mientras que el tratamiento 1 (15% zeolita-35% vermiculita) (0 ppm nHap) tuvo la media general más baja (2.436 ppm de P) (cuadro 7)

Cuadro 6 Cuadro de medias para Fosforo por la interacción de factores (A\*B). UAAAN UL. 2022

Tratamiento		Valor de la media	Significancia
(%zeolita -%vermiculita) (nHap ppm)			
T12	(35-15) (4000)	4.769	a
T11	(35-15) (2000)	4.645	a
T4	(15-35) (4000)	4.461	a

T6	(25-25) (1000)	4.299	a
T9	(35-15) (0)	4.131	a
T5	(25-25) (0)	4.071	a
T10	(35-15) (1000)	4.067	a
T8	(25-25) (4000)	3.997	a
T7	(25-25) (2000)	3.369	a
T3	(15-35) (2000)	3.103	a
T2	(15-35) (1000)	2.769	a
T1	(15-35) (0)	2.436	a

---

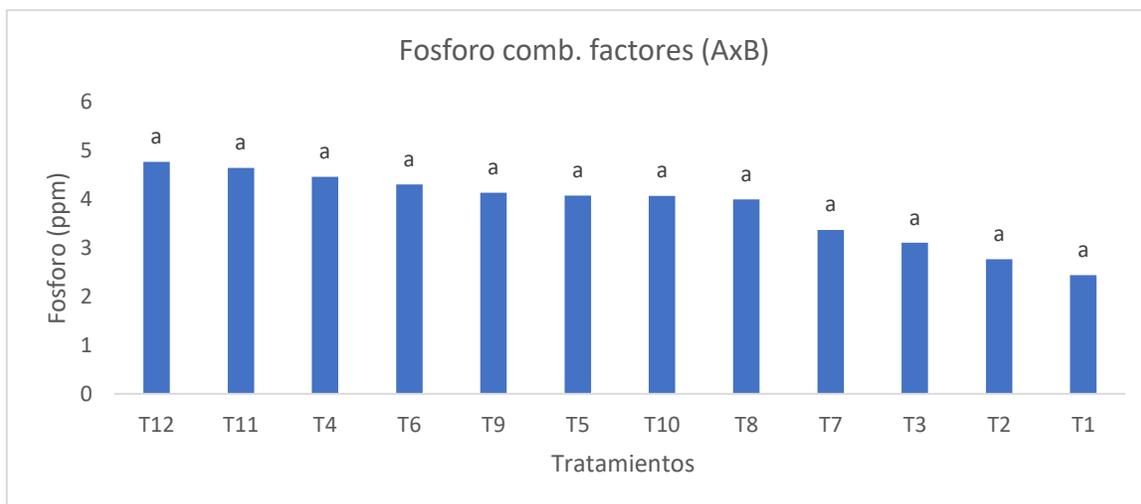


Figura 8 Retención de Fosforo en sustrato por la interacción de factores (A\*B).  
UAAAN UL.2023

### 4.3 Potasio

En la siguiente variable, el análisis de varianza (anexo 3) no mostro significancia estadística al 0.05 con prueba de Tukey para el factor A (sustrato), ni para el factor B (concentración de nHap), así mismo para la interacción AxB.

Si se encontraron diferencias numéricas entre las medias generales de los trat de la interacción resultando el tratamiento 8 (25% zeolita- 25% vermiculita) (4000 ppm nHap) el que tiene el valor más alto (272.5 meq/100 g de k) y el tratamiento 1 (15% zeolita- 35% vermiculita) (0 ppm nHap) el valor más bajo (180.9 meq/100 g de K) (cuadro 8).

Cuadro 7 Cuadro de medias para Potasio por la interacción de factores (A\*B).  
UAAAN UL. 2022

Tratamiento		Valor de la media	Significancia
	(%zeolita -%vermiculita) (nHap ppm)		
T8	(25-25) (4000)	272.5	a
T7	(25-25) (2000)	264.4	a
T6	(25-25) (1000)	259.2	a
T5	(25-25) (0)	258.9	a
T4	(15-35) (4000)	254.6	a
T9	(35-15) (0)	253.1	a
T11	(35-15) (2000)	181.4	a
T12	(35-15) (4000)	180.9	a
T10	(35-15) (1000)	175.3	a
T3	(15-35) (2000)	29.7	a
T2	(15-35) (1000)	29.3	a
T1	(15-35) (0)	29.0	a

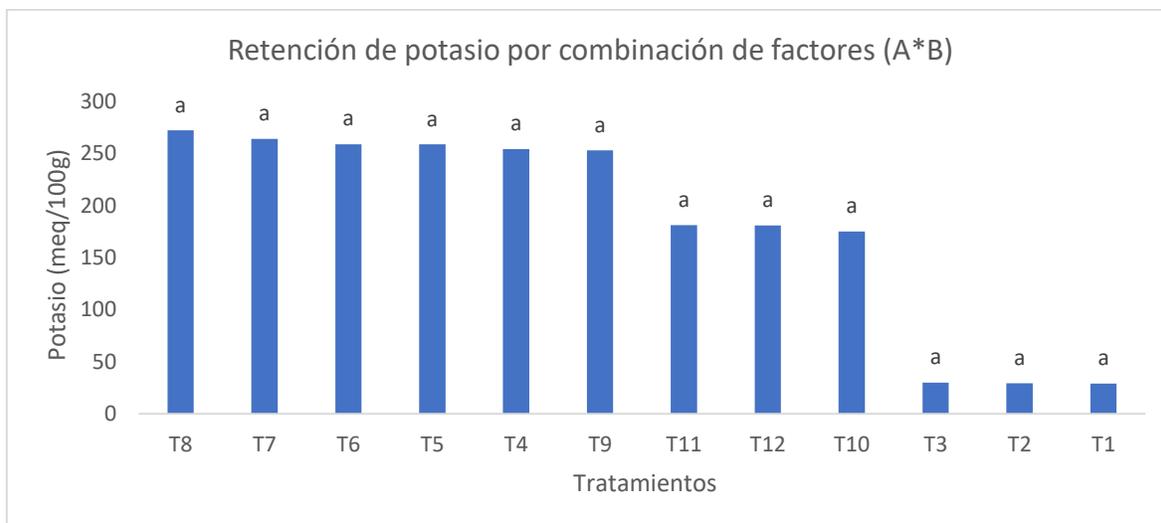


Figura 9 Retención de Potasio en sustrato por la interacción de factores (A\*B). UAAAN UL.2023

#### 4.4 Calcio

En el elemento siguiente, el análisis de varianza (anexo 4) no presentó significancia estadística (NS) al 0.05 con prueba de Tukey para el factor A (sustrato), ni para el factor B (concentración de nHap), así mismo para la interacción AxB.

Si se encontraron diferencias numéricas de las medias generales de los trat de la interacción siendo el tratamiento 7 (25% zeolita- 25% vermiculita) (2000 ppm nHap) el que tiene el valor más alto (28.47 ppm de Ca) y el tratamiento 11 (35% zeolita- 15% vermiculita) (2000 ppm nHap) el valor más bajo (17.03 ppm de Ca) (cuadro 9).

Cuadro 8 Cuadro de medias para Calcio por la interacción de factores (A\*B). UAAAN UL. 2022

Tratamiento		Valor de la media	Significancia
(%zeolita -%vermiculita) (nHap ppm)			
T7	(25-25) (2000)	28.47	a
T9	(35-15) (0)	28.4	a
T8	(25-25) (4000)	28.22	a

T6	(25-25) (1000)	23.31	a
T4	(15-35) (4000)	22.72	a
T3	(15-35) (2000)	21.69	a
T2	(15-35) (1000)	21.36	a
T1	(15-35) (0)	21.03	a
T5	(25-25) (0)	20.94	a
T10	(35-15) (1000)	19.67	a
T12	(35-15) (4000)	18.62	a
T11	(35-15) (2000)	17.03	a

---

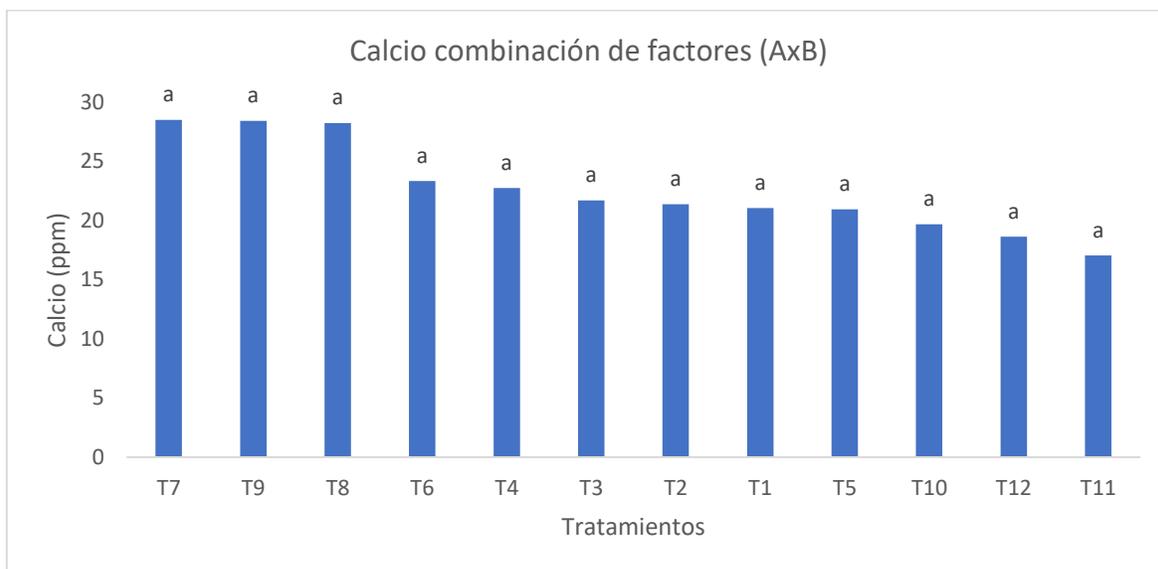


Figura 10 Retención de Calcio en sustrato por la interacción de factores (A\*B).  
 UAAAN UL.2023

#### 4.5 Hierro

En el siguiente parámetro, el análisis de varianza (anexo 5) no demostró significancia estadística al 0.05 con prueba de Tukey para el factor A (sustrato), ni para el factor B (concentración de nHap), así mismo para la interacción AxB.

Si se encontraron diferencias numéricas sobre las medias generales de los trat de la interacción resultando el tratamiento 12 (35% zeolita- 15% vermiculita) (4000 ppm nHap) el que tiene el valor más alto (5.047 ppm de Fe) y el tratamiento 1 (15% zeolita-35% vermiculita) (0 ppm nHap) el valor más bajo (3.238 ppm de Fe) (cuadro 10).

Cuadro 9 Cuadro de medias para Hierro por la interacción de factores (A\*B). UAAAN UL. 2022

Tratamiento		Valor de la media	Significancia
	(%zeolita -%vermiculita) (nHap ppm)		
T12	(35-15) (4000)	5.047	a
T9	(35-15) (0)	4.844	a
T11	(35-15) (2000)	4.773	a
T6	(25-25) (1000)	4.669	a
T8	(25-25) (4000)	4.569	A
T10	(35-15) (1000)	4.404	A
T5	(25-25) (0)	4.373	A
T7	(25-25) (2000)	4.173	A
T4	(15-35) (4000)	4.000	A
T3	(15-35) (2000)	3.904	A
T2	(15-35) (1000)	3.571	A

T1 (15-35) (0) 3.238 A

---

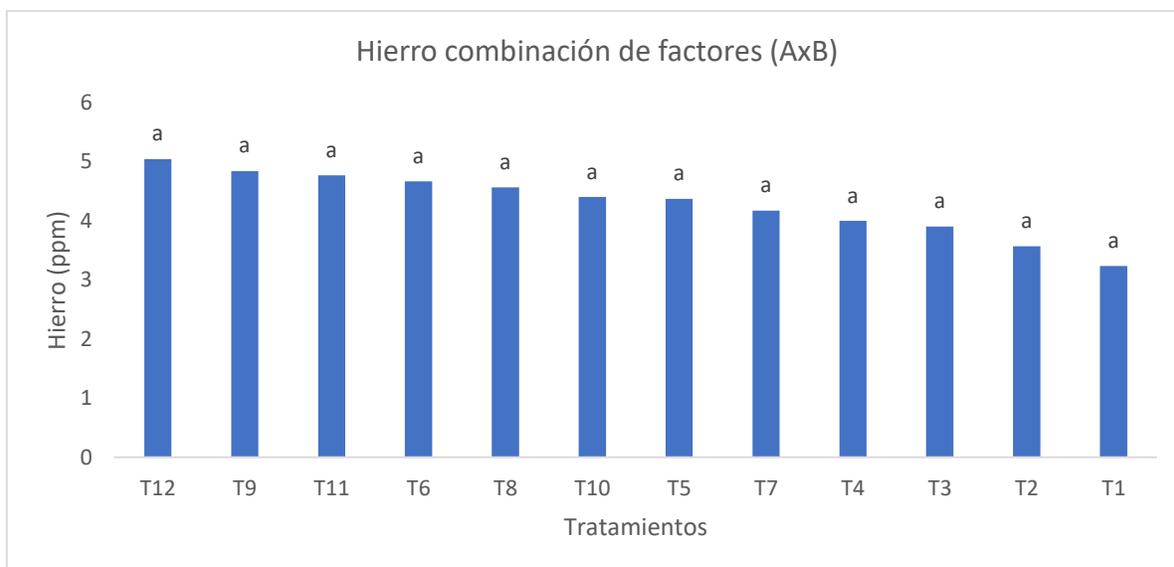


Figura 11 Retención de Hierro en sustrato por la interacción de factores (A\*B).  
UAAAN UL.2023

#### 4.6 Cobre

El análisis de varianza (anexo 6) no demostró significancia estadística al 0.05 con Tukey para el factor A (sustrato), ni para el factor B (concentración de nHap), así mismo para la interacción AxB.

Si se encontraron diferencias numéricas de las medias generales de los trat de la interacción, y el tratamiento 9 (35% zeolita- 15% vermiculita) (0 ppm nHap) el que tiene el valor más alto (5.889 ppm de Cu) y el tratamiento 1 (15% zeolita-35% vermiculita) (0 ppm nHap) el valor más bajo (2.889 ppm de Cu) (cuadro 11).

Cuadro 10 Cuadro de medias para Cobre por la interacción de factores (A\*B).  
UAAAN UL. 2022

Tratamiento		Valor de la media	Significancia
(%zeolita -%vermiculita) (nHap ppm)			
T9	(35-15) (0)	5.889	A
T8	(25-25) (4000)	5.500	A
T12	(35-15) (4000)	5.444	A
T11	(35-15) (2000)	5.000	A
T7	(25-25) (2000)	5.000	A
T10	(35-15) (1000)	4.722	A
T6	(25-25) (1000)	4.556	A
T5	(25-25) (0)	4.000	A
T4	(15-35) (4000)	3.744	A
T3	(15-35) (2000)	3.556	A
T2	(15-35) (1000)	3.222	A
T1	(15-35) (0)	2.889	A

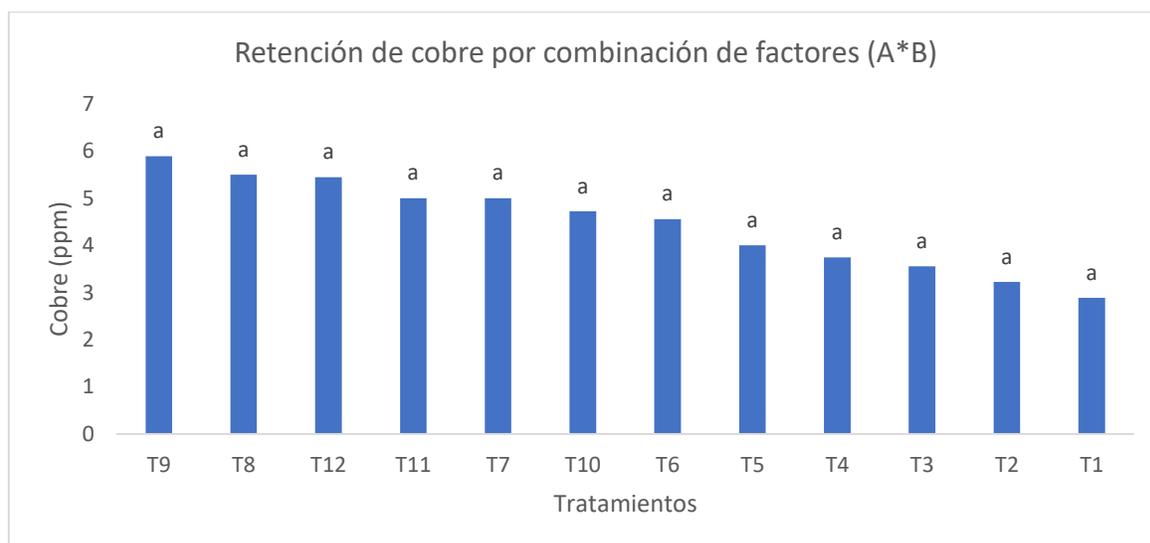


Figura 12 Retención de Cobre en sustrato por la interacción de factores (A\*B).  
UAAAN UL.2023

#### 4.7 Zinc

En el análisis de varianza (anexo 7) no se demostró significancia estadística al 0.05 para el factor A (sustrato), ni para el factor B (concentración de nHap), así mismo para la interacción AxB.

Si se encontraron diferencias numéricas de las medias generales de los trat de la interacción, en el cual el tratamiento 12 (35% zeolita-15% vermiculita) (4000 ppm nHap) el que tiene el valor más alto (7.00 ppm de Zn) y el tratamiento 1 (35% zeolita-15% vermiculita) (2000 ppm nHap) el valor más bajo (4.611 ppm de Zn) (cuadro 12).

Cuadro 11 Cuadro de medias para Zinc por la interacción de factores (A\*B). UAAAN UL. 2022

Tratamiento		Valor de la media	Significancia
(%zeolita -%vermiculita) (nHap ppm)			
T12	(35-15) (4000)	7.00	a
T9	(35-15) (0)	6.389	a
T11	(35-15) (2000)	6.389	a
T6	(25-25) (1000)	6.389	a
T10	(35-15) (1000)	6.111	a
T5	(25-25) (0)	6.00	a
T8	(25-25) (4000)	5.889	a
T4	(15-35) (4000)	5.722	a
T7	(25-25) (2000)	5.611	a
T3	(15-35) (2000)	5.278	a

T2	(15-35) (1000)	4.944	a
T1	(15-35) (0)	4.611	A

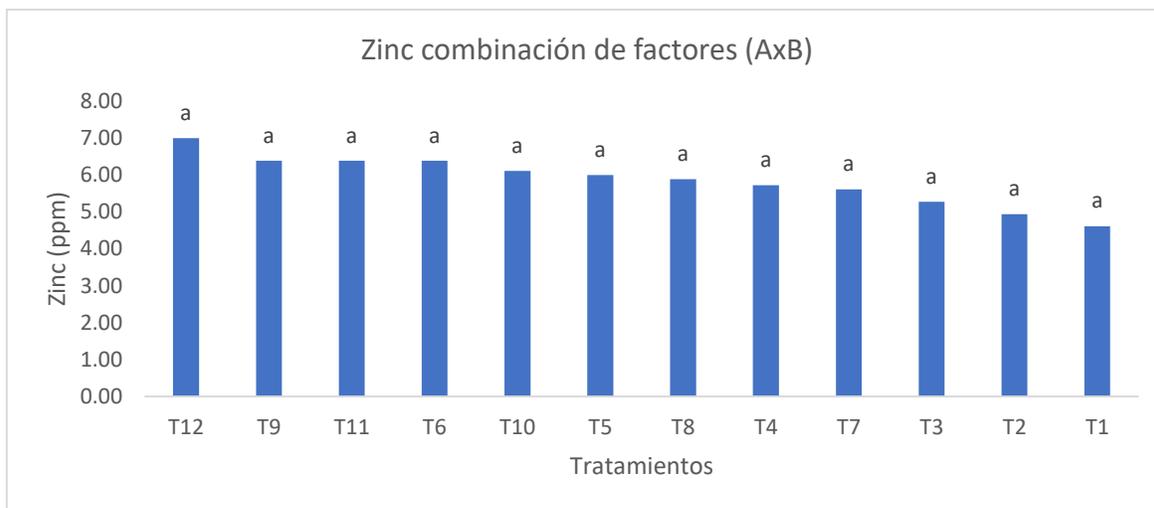


Figura 13 Retención de Zinc en sustrato por la interacción de factores (A\*B). UAAAN UL.2023

#### 4.8 Manganese

En el ANOVA (anexo 8) no hubo significancia estadística al 0.05 para el factor A (sustrato), ni para el factor B (concentración de nHap), así mismo para la interacción AxB.

Si se encontraron diferencias numéricas en las medias generales de los trat de la interacción, encontrando el tratamiento 8 (25% zeolita- 25% vermiculita) (4000 ppm nHap) el que tiene el valor más alto (5.389 ppm de Mn) y el tratamiento 4 (15% zeolita- 35% vermiculita) (4000 ppm nHap) el valor más bajo (3.528 ppm de Mn) (cuadro 13).

Cuadro 12 Cuadro de medias para Manganese por la interacción de factores (A\*B). UAAAN UL. 2022

Tratamiento		Valor de la media	Significancia
(%zeolita -%vermiculita) (nHap ppm)			
T8	(25-25) (4000)	5.389	a
T9	(35-15) (0)	5.333	a
T7	(25-25) (2000)	5.194	a
T12	(35-15) (4000)	4.917	a
T3	(15-35) (2000)	4.833	a
T11	(35-15) (2000)	4.694	a
T2	(15-35) (1000)	4.500	a
T10	(35-15) (1000)	4.333	a
T1	(15-35) (0)	4.167	a
T6	(25-25) (1000)	3.972	a
T5	(25-25) (0)	3.639	a
T4	(15-35) (4000)	3.528	a

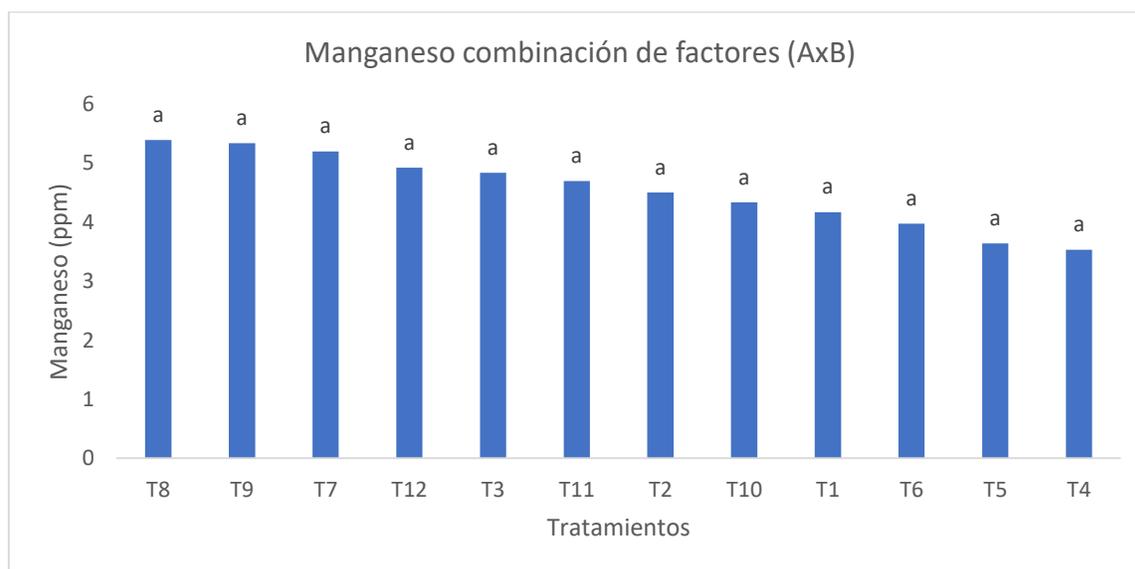


Figura 14 Retención de Manganeso en sustrato por la interacción de factores (A\*B).  
UAAAN UL.2023

De acuerdo con los resultados obtenidos en retención de macronutrientes (Nitrógeno, fosforo, potasio y calcio) en base a la interacción de las concentraciones de nanohidroxiapatita combinado con los diferentes porcentajes de sustrato no presentaron diferencias estadísticas, sin embargo, para nitrógeno en respuesta al factor A que es la combinación de los sustratos, el tratamiento elaborado a base de 15% de zeolita+35% vermiculita retuvo la mayor cantidad de este elemento (N) con una media general del 1.0691 ppm y la combinación 35% zeolita+15% vermiculita la media más alta 2.0655, de acuerdo a (Giroto, Guimaraes, Foschini, & Ribeiro, 2017) el nitrógeno presenta alta volatilización y al realizar las aplicaciones de los fertilizantes alrededor del 40-70% de N se pierden en el ambiente lo cual podría significar una de las causas por la que no se presentaron diferencias significativas de los resultados en la interacción (AXB) así mismo (Haruna et al., 2024) mencionan que para utilizar la hidroxiapatita como nanotransportadora el nitrógeno se debe adicionar directamente a la nanohidroxiapatita para que estas queden dopadas de este elemento y de esta forma pueda ser suministrado a las plantas y lograr una lenta liberación (Feil et al., 2021) (Gunaratne et al., 2016). (Pradhan, Durgam, & Mailapalli, 2021) coinciden con lo anterior ya que en un estudio utilizando hidroxiapatita dopadas de urea evaluando la germinación y retención de nutrientes en arena y suelo agrícola, este estudio mostró una eficiencia dos veces superior a los fertilizantes comerciales de N y P, lo que confirma diferentes respuestas a diferentes medios edáficos. De acuerdo a (Ramirez-Rodriguez et al., 2020) es importante crear diferentes combinaciones de nanopartículas con diferentes elementos; como el nitrógeno que se ha demostrado que es un elemento fundamental en el desarrollo, crecimiento y funcionamiento de los cultivos con estos nuevos nanofertilizantes se puede reducir hasta el 40% de N de un tratamiento convencional.

Por otra parte, el aumento de las concentraciones de calcio y fosforo en los tratamientos a diferencia de los testigos coinciden con los resultados obtenidos por

(Luca Marchiol et al., 2019; Mesa-Ospina & Escobar-Sierra, 2019) donde mencionan que la hidroxiapatita contiene fósforo y calcio en su composición lo cual aumentó la concentración de este en las muestras, aparte del fertilizante aplicado.

En ese mismo sentido (de Oliveira, Paris, & Ribeiro, 2013) menciona que en un estudio realizado, el fósforo que contiene la hidroxiapatita sintetizada presenta mayor solubilidad cuando es sintetizada a 300° C a diferencia de la utilizada en este experimento la cual fue sintetizada a 95° C (Flores-Hernández et al., 2021), lo que pudo provocar el arrastre de fósforo en los tratamientos analizados; ya que el tratamiento 1 el cual no contiene nHap presentó la media general más baja 2.436 ppm y el tratamiento 12 presenta la mayor concentración de nHap (4000 ppm) aplicada, presentando una media general de 4.769 ppm lo cual indica un aumento de 195.77 %, de acuerdo a (L. Marchiol, Lafisco, Fellet, & Adamiano, 2020) en su experimento menciona que el fósforo al no interactuar con la atmósfera como es el caso de nuestro experimento; el fósforo no se libera de forma gaseosa pero si se producen importantes pérdidas de P por lixiviación, corroborando la teoría que cuanto más fuerte es la aglomeración de las nanopartículas, menores son los poros y más pobre su solubilidad (Eugenia, Mihai, Ana-Maria, Mariana, & Marianta-Alexandra, 2019). (Sajadinia, Ghazanfari, Naghavi, Naghavi, & Tahamipur, 2021) difiere de esto ya que menciona que uno de los efectos positivos de los fertilizantes de nanohidroxiapatita es que los métodos sintéticos de la misma evitan la pérdida del fósforo.

Para los resultados de Calcio también se obtuvo un aumento del elemento lixiviado en comparación con lo agregado esto se debe a hidroxiapatita contiene en su composición fosfato cálcico, como lo reporta (Legese, M. Taddesse, Kibret, & Wogi, 2024) quien utilizando zeolitas naturales no modificadas y modificadas, para la utilización eficiente en la agricultura demuestra que la zeolita no modificada es mejor portador de nutrientes catiónicos y la modificada preferible para la liberación lenta, lo que podría dar justificación a los resultados de nuestra investigación.

En cuanto a los resultados obtenidos de micronutrientes no se encontraron diferencias estadísticas significativas, pero si diferencias numéricas entre la media

general más baja y la más alta; para hierro un aumento de 155.86 %, cobre 203.84%, zinc 151.81% y Manganeso 152.74% es importante mencionarlos ya que de acuerdo a (Noman, Ahmed, Wang, & White, 2024) los micronutrientes forman parte importante para mantener la salud y productividad del suelo-planta y aunque estos son requeridos en cantidades mínimas son fundamentales para diversos procesos bioquímicos esenciales. Un estudio elaborado por (Natsume et al., 2018) demostró que para que la zeolita retenga mayor cantidad de Zn esta debe de ser modificada y agregada a la estructura para lograr mayor eficiencia. De acuerdo a nuestros resultados obtenidos la combinación de sustratos influyó en la diferencias numéricas pues las concentraciones de nHap fueron las mismas; tomando en cuenta el resultado de (Battiston et al., 2019) mediante un estudio realizado con hidroxapatita y un compuesto soluble de Cu, demostró que esta combinación modificó el efecto de lavado dependiendo las condiciones experimentales.

En general con lo anterior mencionado se confirma con los estudios que evidencian la importancia y eficiencia de la nanotecnología y su potencial en la agricultura, así mismo comprobado que la nanohidroxapatita tienen alta biodegradabilidad y biocompatibilidad (Ramirez-Rodriguez et al., 2020); por este motivo se siguen haciendo estudios para esta amplia rama.

## **V. CONCLUSIONES**

Al finalizar nuestro estudio y en base a los resultados obtenidos la combinación de sustratos influyo positivamente en la retención de Nitrógeno, mientras que para los demás elementos no se observó diferencia estadística en la retención; estos resultados se obtuvieron utilizando zeolita de un tamaño específico sin embargo en la literatura se reporta que a menor tamaño se aumenta la retención de nutrientes, es por ello se recomienda llevar a cabo más investigaciones enfocadas en evaluar factores como el tamaño de la zeolita y la combinación de sustratos, que podrían mejorar los resultados, así como añadir material vegetal que exprese la retención y absorción de los elementos en su desarrollo.

## VI. RERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abeywardana, L., Sandaruwan, C., Chaturika, S., Karunaratne, V., & Kottegoda, N. (2023). Advanced coating on Zea mays seeds using modified hydroxyapatite nanoparticles as a plant nutrient delivery system for enhanced plant growth. *Current Science (00113891)*, 124(5), 599-606. doi:10.18520/cs/v124/i5/599-606
- Ashby, M. F., Ferreira, P. J., & Schodek, D. L. (2009). Chapter 1 - Nanomaterials and Nanotechnologies: An Overview. In M. F. Ashby, P. J. Ferreira, & D. L. Schodek (Eds.), *Nanomaterials, Nanotechnologies and Design* (pp. 1-16). Boston: Butterworth-Heinemann.
- Battiston, E., Antonielli, L., Di Marco, S., Fontaine, F., & Mugnai, L. (2019). Innovative Delivery of Cu(II) Ions by a Nanostructured Hydroxyapatite: Potential Application in Planta to Enhance the Sustainable Control of *Plasmopara viticola*. *Phytopathology*, 109(5), 748-759. doi:10.1094/PHYTO-02-18-0033-R
- Beaudoin, C., Joncoux, S., Jasmin, J.-F., Berberi, A., McPhee, C., Schillo, R. S., & Nguyen, V. M. (2022). A research agenda for evaluating living labs as an open innovation model for environmental and agricultural sustainability. *Environmental Challenges*, 7, 100505. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100505>
- Bello, M. O., Abdus-Salam, N., Adekola, F. A., Oyewumi-Musa, R. T., & Pal, U. (2024). Synthesis and characterization of zeolite Y from agricultural and municipal wastes: A waste management approach. *Waste Management Bulletin*, 2(2), 122-129. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.04.001>
- Bhattacharjee, R., Kumar, L., Mukerjee, N., Anand, U., Dhasmana, A., Preetam, S., . . . Proćków, J. (2022). The emergence of metal oxide nanoparticles (NPs) as a phytomedicine: A two-facet role in plant growth, nano-toxicity and anti-phyto-microbial activity. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 155, 113658. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biopha.2022.113658>
- Cao, C., Xuan, W., Yan, S., & Wang, Q. (2023). Zeolites synthesized from industrial and agricultural solid waste and their applications: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110898. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110898>
- Carmona, F. J., Guagliardi, A., & Masciocchi, N. (2022). Nanosized Calcium Phosphates as Novel Macronutrient Nano-Fertilizers. *Nanomaterials*, 12(15). doi:10.3390/nano12152709
- Castro Campos, B. (2022). The Rules-Boundaries-Behaviours (RBB) framework for farmers' adoption decisions of sustainable agricultural practices. *Journal of Rural Studies*, 92, 164-179. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2022.03.012>
- Chapman, H. D. (1965). Cation-Exchange Capacity. In *Methods of Soil Analysis* (pp. 891-901).
- Dahoumane, S. A., Jeffryes, C., Mechouet, M., & Agathos, S. N. (2017). Biosynthesis of Inorganic Nanoparticles: A Fresh Look at the Control of Shape, Size and Composition. *bioengineering*, 4(1), 14.

- de Oliveira, M. A. R., Paris, E. C., & Ribeiro, C. (2013). STUDY OF POTENTIAL USE OF HYDROXYAPATITE FOR SOIL FERTILIZATION. *Quimica Nova*, 36(6), 790-792. doi:10.1590/s0100-40422013000600008
- Demirchan, A. C., & Gshalaev, V. S. (2012). Hydroxyapatite : Synthesis, Properties, and Applications. In *Biomaterials--properties, Production and Devices*. Hauppauge, N.Y.: Nova Science Publishers, Inc.
- Dhingra, P., Sharma, S., Singh, K. H., Kushwaha, H. S., Barupal, J. K., Haq, S., . . . Kachhwaha, S. (2022). Seed priming with carbon nanotubes and silicon dioxide nanoparticles influence agronomic traits of Indian mustard (*Brassica juncea*) in field experiments. *Journal of King Saud University - Science*, 34(4), 102067. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102067>
- Eugenia, S. C., Mihai, C. T., Ana-Maria, S., Mariana, I., & Marianta-Alexandra, S. (2019). INFLUENCE OF SYNTHESISED HYDROXYAPATITE AS A PHOSPHORUS FERTILIZER. *Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 19(1), 253-259. doi:10.5593/sgem2019/3.2
- FAO. (2009). La Agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Retrieved from <https://www.fao.org/global-perspectives-studies/food-agriculture-projections-to-2050/es>
- FAO. (2019). World fertilizer trends and outlook to 2022. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Retrieved from <https://www.fao.org/3/ca6746en/CA6746EN.pdf>
- Feil, S. B., Rodegher, G., Gaiotti, F., Zuluaga, M. Y. A., Carmona, F. J., Masciocchi, N., . . . Pii, Y. (2021). Physiological and Molecular Investigation of Urea Uptake Dynamics in *Cucumis sativus* L. Plants Fertilized With Urea-Doped Amorphous Calcium Phosphate Nanoparticles. *FRONTIERS IN PLANT SCIENCE*, 12. doi:10.3389/fpls.2021.745581
- Flores-Hernández, E. A., Lira-Saldivar, R. H., Ruiz-Torres, N. A., García-López, J. I., Moreno-Reséndez, A., Rodríguez-Dimas, N., . . . Mendoza-Retana, S. S. (2021). Síntesis de nanopartículas de hidroxiapatita y su efecto en plántulas de *Raphanus sativus*. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(1). doi:10.19136/era.a8n1.2747
- Gavito, M. E., van der Wal, H., Aldasoro, E. M., Ayala-Orozco, B., Bullén, A. A., Cach-Pérez, M., . . . Villanueva, G. (2017). Ecología, tecnología e innovación para la sustentabilidad: retos y perspectivas en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 150-160. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.09.001>
- Giroto, A. S., Guimaraes, G. G. F., Foschini, M., & Ribeiro, C. (2017). Role of Slow-Release Nanocomposite Fertilizers on Nitrogen and Phosphate Availability in Soil. *Scientific Reports*, 7, 11. doi:10.1038/srep46032
- Gunaratne, G. P., Kottegoda, N., Madusanka, N., Munaweera, I., Sandaruwan, C., Priyadarshana, W., . . . Karunaratne, V. (2016). Two new plant nutrient nanocomposites based on urea coated hydroxyapatite: Efficacy and plant uptake. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 86(4), 494-499.
- Haruna, M. S., Oladapo, B. H., Kolawole, S. Y., Scholastica, C. E., & Muhammad, H. A. (2024). Carbon nanotube reinforced nanohybrid urea-hydroxyapatite fertilizer for an improved nutrients utilization efficiency and reducing

- environmental pollution. *Scientific African*, 23, e02099. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02099>
- Heiligtag, F. J., & Niederberger, M. (2013). The fascinating world of nanoparticle research. *Materials Today*, 16(7), 262-271. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.07.004>
- Kjeldahl, J. (1883). Neue Methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Körpern. In *Zeitschrift für analytische Chemie* (Vol. 22, pp. 366-382).
- Kumar, A., Jayeoye, T. J., Mohite, P., Singh, S., Rajput, T., Munde, S., . . . Parihar, A. (2024). Sustainable and consumer-centric nanotechnology-based materials: An update on the multifaceted applications, risks and tremendous opportunities. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 38, 101148. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101148>
- Kumar, R., Dadhich, A., Dhiman, M., Sharma, L., & Sharma, M. M. (2024). Stimulatory effect of ZnO nanoparticles as a nanofertilizer in seed priming of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) and their bioactivity studies. *South African Journal of Botany*, 165, 30-38. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.12.001>
- Laurino, C., & Palmieri, B. (2015). Zeolite: "the magic stone: main nutritional, environmental, experimental and clinical fields of application %J Nutrición Hospitalaria. 32, 573-581.
- Legese, W., M. Taddesse, A., Kibret, K., & Wogi, L. (2024). Effects of natural and modified zeolite based composite fertilizers on slow release and nutrient use efficiency. *Heliyon*, 10(3), e25524. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25524>
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. 42(3), 421-428. doi:<https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
- Lira-Saldivar, R., Méndez, B., Felipe-Victoriano, M., vera reyes, I., Cardenas-Flores, A., & Ibarra-Jiménez, L. (2017). *Gas exchange, yield and fruit quality of Cucurbita pepo cultivated with zeolite and plastic mulch.*
- Lu, C., & Tian, H. (2017). Global nitrogen and phosphorus fertilizer use for agriculture production in the past half century: shifted hot spots and nutrient imbalance. *Earth Syst. Sci. Data*, 9(1), 181-192. doi:10.5194/essd-9-181-2017
- Luan, H., Wu, Q., Wu, J., Meng, X., & Xiao, F.-S. (2024). Templates for the synthesis of zeolites. *Chinese Journal of Structural Chemistry*, 100252. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cjsc.2024.100252>
- Luna-Herrera, J., Pérez-Martínez, D. E., Barradas-Hernández, V. M., & Zenteno-Cuevas, R. (2021). Nanopartículas como transportadores de fármacos: una herramienta prometedora contra la tuberculosis. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 38, 143-152.
- Marchiol, L., Filippi, A., Adamiano, A., Degli Esposti, L., Iafisco, M., Mattiello, A., . . . Braidot, E. (2019). Influence of Hydroxyapatite Nanoparticles on Germination and Plant Metabolism of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.): Preliminary Evidence. *Agronomy*, 9(4), 161-161. doi:10.3390/agronomy9040161
- Marchiol, L., Iafisco, M., Fellet, G., & Adamiano, A. (2020). Nanotechnology support the next agricultural revolution: Perspectives to enhancement of nutrient use efficiency. In D. L. Sparks (Ed.), *ADVANCES IN AGRONOMY, VOL 161* (Vol. 161, pp. 27-116).

- Méndez-Argüello, B., & Lira Saldivar, R. H. (2019). Uso potencial de la zeolita en la agricultura sustentable de la nueva revolución verde. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(17), 191-193. doi:10.19136/era.a6n17.1810
- Mesa-Ospina, N., & Escobar-Sierra, D. M. (2019). Evaluación de recubrimientos de quitosano sobre cuerpos porosos de hidroxapatita. *Scientia et Technica*, 24(1), 161-172.
- Mondal, S., Sabuj, M. M. A., Habib, S. B., & Rahman, M. Z. (2024). Sustainable nanotechnology and nanomaterials: Environmental and biological applications. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*: Elsevier.
- Moreno Reséndez, A., García Mendoza, V., Reyes Carrillo, J. L., Vásquez Arroyo, J., & Cano Ríos, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. *Revista Colombiana de Biotecnología*, XX(1), 68-83.
- Nair, R., Varghese, S. H., Nair, B. G., Maekawa, T., Yoshida, Y., & Kumar, D. S. (2010). Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant Science*, 179(3), 154-163. doi:<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.04.012>
- Natsume, K., Kenta, I., Bangda, W., Yutaka, Y., Shanmugam, P. E., Keiji, I., . . . Tatsuya, O. (2018). Increasing the ion-exchange capacity of MFI zeolites by introducing Zn to aluminosilicate frameworks. *Dalton Transactions*, 47(28). doi:10.1039/c8dt01391h
- Nehra, V., Saharan, B. S., & Choudhary, M. (2016). Evaluation of *Brevibacillus brevis* as a potential plant growth promoting rhizobacteria for cotton (*Gossypium hirsutum*) crop. *SpringerPlus*, 5(1), 948. doi:10.1186/s40064-016-2584-8
- NNI. (2013). "National Nanotechnology Initiative", 2013. Retrieved from <http://www.nano.gov>
- Noman, M., Ahmed, T., Wang, J., & White, J. C. (2024). Micronutrient–microbiome interplay: a critical regulator of soil–plant health. *Trends in Microbiology*, 32(4), 319-320. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tim.2024.02.008>
- OECD. (2013). Regulatory Frameworks for Nanotechnology in Foods and Medical Products. doi:10.1787/5k47w4vsb4s4-en
- Olsen, S. R., & Sommers, L. E. (1982). METHODS OF SOIL ANALYSIS Part 2, Second Edition. In *Methods of Soil Analysis. Agronomy Monographs*. (Second edition ed., pp. 403-430). American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison.
- Oshida, Y. (2015). *Hydroxyapatite : Synthesis and Applications*. New York, [New York] [222 East 46th Street, New York, NY 10017]: Momentum Press.
- Pandey, G., & Jain, P. (2020). Assessing the nanotechnology on the grounds of costs, benefits, and risks. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 9. doi:10.1186/s43088-020-00085-5
- Pérez-de-Luque, A. (2017). Interaction of Nanomaterials with Plants: What Do We Need for Real Applications in Agriculture? , 5. doi:10.3389/fenvs.2017.00012
- Pradhan, S., Durgam, M., & Mailapalli, D. R. (2021). Urea loaded hydroxyapatite nanocarrier for efficient delivery of plant nutrients in rice. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 67(3), 371-382. doi:10.1080/03650340.2020.1732940

- Pujari-Palmer, S., Lu, X., & Ott, M. K. (2017). The Influence of Hydroxyapatite Nanoparticle Morphology on Embryonic Development in a Zebrafish Exposure Model. *Nanomaterials*, 7(4), 6. doi:10.3390/nano7040089
- Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C. O., Biswas, P. J. J. o. a., & chemistry, f. (2017). Nanofertilizer for Precision and Sustainable Agriculture: Current State and Future Perspectives. *Agricultural and food chemistry*, 66 26, 6487-6503.
- Ramirez-Rodriguez, G. B., Dal Sasso, G., Carmona, F. J., Miguel-Rojas, C., Perez-de-Luque, A., Masciocchi, N., . . . Delgado-Lopez, J. M. (2020). Engineering Biomimetic Calcium Phosphate Nanoparticles: A Green Synthesis of Slow-Release Multinutrient (NPK) Nanofertilizers. *ACS APPLIED BIO MATERIALS*, 3(3), 1344-1353. doi:10.1021/acsabm.9b00937
- Rop, K., Mbui, D., Karuku, G. N., Michira, I., & Njomo, N. (2020). Characterization of water hyacinth cellulose-g-poly(ammonium acrylate-co-acrylic acid)/nano-hydroxyapatite polymer hydrogel composite for potential agricultural application. *Results in Chemistry*, 2, 100020. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rechem.2019.100020>
- Sajadinia, H., Ghazanfari, D., Naghavi, K., Naghavi, H., & Tahamipur, B. (2021). A comparison of microwave and ultrasound routes to prepare nano-hydroxyapatite fertilizer improving morphological and physiological properties of maize (*Zea mays* L.). *Heliyon*, 7(3), e06094. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06094>
- Sánchez Castañeda, J. (2017). Mercado de productos agrícolas ecológicos en Colombia. *Suma de Negocios*, 8(18), 156-163. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sumneg.2017.10.001>
- Schmidt, R. H. (1989). The arid zones of Mexico: climatic extremes and conceptualization of the Sonoran Desert. *Journal of Arid Environments*, 16(3), 241-256. doi:[https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(18\)30940-6](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(18)30940-6)
- Spagnoletti, F. N., Spedalieri, C., Kronberg, F., & Giacometti, R. (2019). Extracellular biosynthesis of bactericidal Ag/AgCl nanoparticles for crop protection using the fungus *Macrophomina phaseolina*. *Journal of Environmental Management*, 231, 457-466. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.081>
- Svatetz, C. A. G. (2023). Emergencia climática y alimentación. *FMC - Formación Médica Continuada en Atención Primaria*, 30(6), 306-311. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fmc.2023.02.006>
- Timmusk, S., Behers, L., Muthoni, J., Muraya, A., & Aronsson, A.-C. (2017). Perspectives and Challenges of Microbial Application for Crop Improvement. *FRONTIERS IN PLANT SCIENCE*, 8. doi:10.3389/fpls.2017.00049
- Tutor-Sánchez, J. D. (2018). NANOCIENCIAS Y NANOTECNOLOGÍAS PARA UN DESARROLLO SOSTENIBLE. *MOMENTO*, 0(56E), 1-13.
- Ul Haq, I., Ijaz, S., & Khan, N. A. (2020). Application of Nanotechnology for Integrated Plant Disease Management. In I. Ul Haq & S. Ijaz (Eds.), *Plant Disease Management Strategies for Sustainable Agriculture through Traditional and Modern Approaches* (pp. 173-185). Cham: Springer International Publishing.
- Upadhyay, D. D., Goyal, A. K., Maji, S., Dwivedi, A., & Pandey, G. (2023). Biosynthesis of ZnO and TiO<sub>2</sub> nanoparticles using *Ipomoea carnea* leaf

- extract and its effect on black carrot (*Daucus carota* L.) cv. Pusa Asita. *Plant Physiology and Biochemistry*, 202, 107908. doi:<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107908>
- Xiong, L., Wang, P., Hunter, M. N., & Kopittke, P. M. (2018). Bioavailability and movement of hydroxyapatite nanoparticles (HA-NPs) applied as a phosphorus fertiliser in soils. *Environmental Science: Nano*, 5(12), 2888-2898. doi:10.1039/C8EN00751A
- Zhang, L. (2020). Applications, Challenges and Development of Nanomaterials and Nanotechnology. *journal of the chemical society of pakistan*, 42.

## VII. ANEXOS

Anexo 1 Análisis de varianza para Nitrógeno en la interacción de factores (A\*B).  
UAAAN UL. 2023

FV	GL	SC	CM	F. tabulada		F. calculada	Pr>f
				0.01	0.05		
Fact. A	2	17.87	8.93	4.83	3.09	5.66	0.0048 **
Fact. B	3	1.66	0.55	3.99	2.70	0.35	0.7883 NS
Int A*B	6	3.34	0.55	3.00	2.19	0.35	0.9064 NS
Error exp	96	151.59	1.57				
Total	107	174.47					

\*\* = Significativo  $P \leq 0.01$ ; Ns= No significativa

Anexo 2. Análisis de varianza para Fosforo en la interacción de factores (A\*B).  
UAAAN UL. 2023

FV	GL	SC	CM	F. tabulada		F. calculada	Pr>f
				0.01	0.05		
Fact. A	2	26.82	13.41	4.83	3.09	1.66	0.1955 NS
Fact. B	3	12	4	3.99	2.70	0.5	0.6862 NS
Int A*B	6	16.99	2.83	3.00	2.19	0.35	0.9079 NS
Error exp	96	775.37	8.07				
Total	107	831.2					

Ns= No significativa

Anexo 3. Análisis de varianza para Potasio en la interacción de factores (A\*B).  
UAAAN UL. 2023

FV	GL	SC	CM	F. tabulada		F. calculada	Pr>f
				0.01	0.05		
Fact. A	2	583623.5	291812	4.83	3.09	2.79	0.0666 NS
Fact. B	3	114037.1	38012	3.99	2.70	0.36	0.7798 NS
Int A*B	6	266680.77	44447	3.00	2.19	0.42	0.861 NS
Error exp	96	10051127	104699				
Total	107	11015468					

Ns= No significativa

Anexo 4. Análisis de varianza para Calcio en la interacción de factores (A\*B).  
UAAAN UL. 2023

FV	GL	SC	CM	F. tabulada		F. calculada	Pr>f
				0.01	0.05		
Fact. A	2	379.54	189.77	4.83	3.09	0.18	0.8365 NS
Fact. B	3	66.36	22.12	3.99	2.70	0.02	0.9959 NS
Int A*B	6	1023.7	170.61	3.00	2.19	0.16	0.9864 NS
Error exp	96	101824.38	1060.67				
Total	107	103294.00					

Ns= No significativa

Anexo 5. Análisis de varianza para Hierro en la interacción de factores (A\*B).  
UAAAN UL. 2023

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F. tabulada</b>		<b>F. calculada</b>	<b>Pr&gt;f</b>
				0.01	0.05		
Fact. A	2	22.53	11.26	4.83	3.09	1.12	0.3312 NS
Fact. B	3	2.33	0.77	3.99	2.70	0.08	0.9722 NS
Int A*B	6	4.15	0.69	3.00	2.19	0.07	0.9987 NS
Error exp	96	967.76	10.08				
Total	107	996.78					

Ns= No significativa

Anexo 6. Análisis de varianza para Cobre en la interacción de factores (A\*B).  
UAAAN UL. 2023

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F. tabulada</b>		<b>F. calculada</b>	<b>Pr&gt;f</b>
				0.01	0.05		
Fact. A	2	70.72	35.36	4.83	3.09	2.65	0.0759 NS
Fact. B	3	8.64	2.88	3.99	2.70	0.22	0.8852 NS
Int A*B	6	13.29	2.21	3.00	2.19	0.17	0.9852 NS
Error exp	96	1281.55	13.34				
Total	107	1374.21					

Ns= No significativa

Anexo 7. Análisis de varianza para Zinc en la interacción de factores (A\*B). UAAAN UL. 2023

FV	GL	SC	CM	F. tabulada		F. calculada	Pr>f
				0.01	0.05		
Fact. A	2	32.66	16.33	4.83	3.09	0.52	0.5937 NS
Fact. B	3	4.52	1.5	3.99	2.70	0.05	0.9858 NS
Int A*B	6	8.16	1.36	3.00	2.19	0.04	0.9996 NS
Error exp	96	2991.05	31.15				
Total	107	3036.41					

Ns= No significativa

Anexo 8. Análisis de varianza para Manganeso en la interacción de factores (A\*B). UAAAN UL. 2023

FV	GL	SC	CM	F. tabulada		F. calculada	Pr>f
				0.01	0.05		
Fact. A	2	5.69	2.84	4.83	3.09	0.19	0.83 NS
Fact. B	3	6.46	2.15	3.99	2.70	0.14	0.93 NS
Int A*B	6	27.19	4.53	3.00	2.19	0.3	0.93 NS
Error exp	96	1473.7	15.35				
Total	107	1513.06					

Ns= No significativa