

Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**DISEÑO DE UN FERTILIZANTE GRANULAR A BASE DE ABONO ORGÁNICO
ENRIQUECIDO CON MINERALES PARA CULTIVOS DE HORTALIZAS**

Programa de Maestría en Ingeniería

Presentado por:

CARLOS BERNARDO MÁRQUEZ SARABIA

Dirigida por:

DROCHSS PETRY VALENCIA OCHOA Ph.D.

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

agosto del 2024

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	9
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	13
2.1 Planteamiento del problema:	13
2.2 Pregunta de investigación:.....	15
3. OBJETIVOS DEL PROYECTO	16
3.1. Objetivo general	16
3.2. Objetivos específicos.....	16
4. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA	17
4.1 Eficacia de los fertilizantes por condiciones del suelo.....	17
4.2 Metales pesados en algunos fertilizantes químicos	20
4.3 Fertilización orgánica combinado y la revelación de la forma física granular.....	21
4.4 Subproductos del procesamiento de caña de azúcar y su potencial en la industria de los fertilizantes	23
5. METODOLOGIA	24
5.1 Necesidades nutricionales de las hortalizas.....	24
5.2 Caracterización del abono orgánico a enriquecer.....	24
5.3 Evaluación de deficiencias nutricionales.....	25
5.4 Selección de materias primas fuentes de nutrientes	26
5.4.1 Fuente de boro	26
5.4.2 Fuente de magnesio	27
5.4.3 Fuente de fosforo	28
5.4.4 Fuente de calcio	29
5.4.5 Fuente de potasio	30
5.5 Balance de masas para definición de cantidad de materias primas	31

5.6	Consecución de suelo para cultivo experimental	34
5.7	Definición de plan de fertilización de tomate.....	35
5.8	Granulación del abono orgánico enriquecido con materias primas.....	36
5.9	Estabilidad física del grano	38
5.9.1	Humedad.....	38
5.9.2	Tamaño de partícula.....	38
5.9.3	Dureza.....	39
5.10	Resultado de análisis químico del fertilizante granulado	39
5.11	Evaluación del fertilizante en cultivo experimental de tomate.....	40
6.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	46
6.1	Enriquecimiento del abono orgánico y definición de materias primas	46
6.2	Granulación de abono orgánico enriquecido	46
6.3	Altura de las plantas como función del tratamiento	47
6.4	Diámetro de las plantas en función del tratamiento.	49
6.5	Cantidad de flores en plantas de tomate en función del tratamiento.	51
6.6	Cantidad de frutos en función del tratamiento.....	53
6.7	Peso de frutos en función del tratamiento.	55
6.8	Peso de fruto en función de la aplicación de fertilizante.....	57
7.	CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS	60
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Requerimientos nutricionales promedio para hortalizas [51, 52, 53] y análisis químicos del abono orgánico.....	25
Tabla 2. Opciones de materia primas fuente de boro para fabricación de fertilizantes.	27
Tabla 3. Opciones de materia primas fuente de magnesio para fabricación de fertilizantes.	28
Tabla 4. Opciones de materia primas fuente de fósforo para fabricación de fertilizantes...	29
Tabla 5. Opciones de materia primas fuente de calcio para fabricación de fertilizantes.	30
Tabla 6. Opciones de materia primas fuente de potasio para fabricación de fertilizantes..	31
Tabla 7. Composición de materias primas definidas para formulación del fertilizante.....	34
Tabla 8. Resultados de laboratorio de análisis fisicoquímico para suelo de estudio.	34
Tabla 9. Plan de fertilización y tratamientos para cultivo experimental de tomate.	36
Tabla 10. Resultados de medición de dureza en los gránulos de fertilizante diseñado.	39
Tabla 11. Registro de mediciones de alturas de los tallos en centímetros para los 4 tratamientos, 4 bloques y durante las 12 semanas del experimento.	47
Tabla 12. Registro de mediciones en milímetros para los diámetros de los tallos de las plántulas en función del tratamiento, bloque experimental y semanas.	49
Tabla 13. Registro de conteo de flores por planta para cada tratamiento durante las 11 semanas de medición de esta característica.....	52
Tabla 14. Registro de conteo semanal de tomates en función del tratamiento.	54
Tabla 15. Registro de pesos de tomates extraídos en gramos (Para los tratamientos 2, 3 y 4, con base a la cantidad de tomates encontrados, se presentan en la tabla un promedio de 10 datos por planta)	56
Tabla 16. Índice del rendimiento del tomate en gramos en función de la cantidad de fertilizante aplicado en cada tratamiento.....	58

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. (a) Materias primas para el fertilizante. (b) Mezcla de materias primas.....	37
Figura 2. Granulación de fertilizante en disco rotatorio con aplicación de solución líquida para aglutinar	37
Figura 3. Fertilizante granulado con tamaño de partícula de 2 a 4 mm y dureza de 2 kgf/in ²	40
Figura 4. (a) Cultivo plántulas recién trasplantadas (b) Cultivo semana 12 crecimiento máximo de plántulas.....	44
Figura 5. Comparativo de tomates semana 10, (a) sin aplicación, (b) fertilización tradicional, (c) orgánica, (d) orgánica aumentada	45
Figura 6. Tomates cosechados semana 12 para tratamientos (a) sin aplicación, (b) fertilización tradicional, (c), aplicación orgánica, (b) orgánica aumentada	45
Figura 7. Estudio porcentual del cambio de altura de las plantas en función del tratamiento	48
Figura 8. Estudio porcentual del aumento del diámetro de los tallos en función del tratamiento.....	51
Figura 9. Visualización gráfica de la cantidad de flores por planta en cada tratamiento para las semanas de medición.....	53
Figura 10. Cantidad de frutos de tomate por planta para cada tratamiento y en función de las semanas.....	55

Agradecimientos y dedicatoria

La culminación de esta tesis no habría sido posible sin el apoyo y la colaboración de muchas personas y organizaciones. Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todos ellos.

En primer lugar, quiero agradecer a mi director de tesis, Drochss Petry Valencia, por su orientación, paciencia y apoyo continuo a lo largo de este proceso. Sus valiosos comentarios, conocimientos técnicos y su constante motivación han sido fundamentales para la realización de este trabajo.

Agradezco también a la Dra. Sandra Patricia Loaiza, por sus sugerencias constructivas y su tiempo dedicado a revisar y mejorar este trabajo.

Un agradecimiento especial a mi familia, por su amor incondicional y su apoyo constante. A mis padres, Bernardo Márquez y Esther Sarabia, por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mis hermanas y sobrino, Yessika Márquez, María Dayana Márquez y Juan Esteban Contreras, por estar siempre ahí para mí, en los buenos y en los malos momentos.

También quiero agradecer a la Universidad Javeriana Cali y empresa Colinagro SA por proporcionar los recursos y el ambiente necesario para llevar a cabo esta investigación. Sin su apoyo, esta tesis no habría sido posible.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a mi compañera de vida, Ana María Pardo Rico, que de una manera u otra han contribuido a la realización de esta tesis. Su ayuda y apoyo han sido cruciales para alcanzar este objetivo con sus ideas y paciencia.

RESUMEN

El presente proyecto se centró en el diseño de un fertilizante granular orgánico, utilizando un abono orgánico elaborado con subproductos de los ingenios azucareros como cachaza, vinaza, cenizas y bagazo y enriqueciendo su contenido de nutrientes con la incorporación de materias primas de carácter orgánico. Inicialmente, se realizaron análisis fisicoquímicos para determinar las deficiencias nutricionales tanto del abono orgánico como del suelo empleado para la producción de hortalizas. A su vez, la revisión bibliográfica fue fundamental para identificar los requerimientos agronómicos específicos de los cultivos de hortalizas, con un enfoque particular en el cultivo experimental de tomate.

La metodología implementada incluyó la selección de materias primas ricas en nutrientes como fósforo, potasio, calcio, magnesio, boro y azufre, y la granulación de la forma física polvo del abono orgánico y materias primas seleccionadas. A través de técnicas de mezcla y granulación, se logró un fertilizante con tamaño de partícula de 2.0 a 4.0 mm, humedad del 3.0% y dureza de 2 kgf/in², necesarias para garantizar la estabilidad física de los gránulos de fertilizante en su aplicación en el campo.

El fertilizante desarrollado fue evaluado en un cultivo experimental de tomate, utilizando un diseño experimental de bloques completos al azar con 4 tratamientos y 4 réplicas. Los tratamientos incluyeron aplicaciones de fertilizante orgánico, fertilizante tradicional y un testigo sin ningún tipo de aplicación del fertilizante. Los resultados mostraron un significativo incremento en el crecimiento vegetativo, la floración y la producción de frutos en las plantas tratadas con el fertilizante orgánico diseñado. Estos resultados destacan el potencial del fertilizante como una alternativa sostenible y efectiva para mejorar la productividad y calidad de los cultivos de hortalizas en la región. Este estudio demuestra que es posible desarrollar un fertilizante granular aprovechando subproductos industriales y materias primas de naturaleza orgánica como Leonardita, Yeso Agrícola, Roca Fosfórica, Silicato de Magnesio, Ulexita, Bentonita, Ácidos Húmicos y Fúlvicos.

ABSTRACT

This project focused on the design of an organic granular fertilizer, using an organic fertilizer made from by-products of sugar mills such as cachaza, vinasse, ashes and bagasse. Enriching its nutrient content with the incorporation of organic raw materials. First of all, physicochemical analyses were carried out to determine the nutritional deficiencies of both, the organic fertilizer and the soil used for vegetable production. In turn, the bibliographic review was essential to identify the specific agronomic requirements of vegetable crops, with a particular focus on the experimental cultivation of tomato.

The methodology implemented included the selection of raw materials rich in nutrients, such as phosphorus, potassium, calcium, magnesium, boron and sulfur, additionally, the granulation of the physical powder form of organic fertilizer and selected raw materials. Through mixing and granulation techniques, a fertilizer with particle size of 2.0 to 4.0 mm, humidity of 3.0% and hardness of 2 kgf/in² was achieved, necessary to guarantee the physical stability of the fertilizer granules in their application in the field.

The developed fertilizer was evaluated in an experimental tomato crop, using a randomized complete block experimental design with 4 treatments and 4 replications. Treatments included applications of organic fertilizer, traditional fertilizer, and a control without any type of fertilizer application. The results showed a significant increase in vegetative growth, flowering and fruit production in plants treated with the designed organic fertilizer. These results stand out the potential of fertilizer as a sustainable and effective alternative to improve the productivity and quality of vegetable crops in the region. This study demonstrates that it's possible to develop a granular fertilizer using industrial by-products and raw materials of organic nature such as Leonardite, Agricultural Gypsum, Phosphoric Rock, Magnesium Silicate, Ulexite, Bentonite, Humic and Fulvic Acids

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento proyectado de la población mundial, que alcanzará los 9.700 millones para el año 2070 [1], plantea desafíos críticos para la seguridad alimentaria global, intensificando la necesidad de aumentar la producción de cultivos y satisfacer la demanda de alimentos. Los fertilizantes químicos juegan un papel crucial, contribuyendo al 50% del rendimiento de los cultivos [2]. Sin embargo, su uso excesivo y las bajas tasas de aprovechamiento [3] generan la contaminación del agua, la degradación de los suelos, emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación del aire y esto se debe a que los fertilizantes químicos, al disolverse rápidamente en contacto con el agua de riego o la humedad del suelo, pueden provocar concentraciones excesivas de nutrientes cerca de las raíces [10]. Cuando el suelo no tiene las condiciones adecuadas para transportar y permitir que sean absorbidos estos nutrientes se produce una pérdida significativa del fertilizante [3]. Por lo tanto, mejorar la calidad del suelo es esencial para maximizar su aprovechamiento y avanzar hacia una producción alimentaria sostenible y eficaz [12, 28].

Además de proporcionar nutrientes, los fertilizantes químicos sintéticos son una fuente significativa de contaminación por metales pesados [29] como plomo (Pb), cromo (Cr), cadmio (Cd), níquel (Ni), que pueden ingresar en la cadena productiva de los fertilizantes a consecuencia de su presencia en las materias primas [30]. Una vez disueltos en los suelos agrícolas, los iones metálicos pueden translocarse a los cultivos y trasladarse a la cadena alimentaria animal y humana [5, 6, 7, 26, 31, 32]. A su vez, estos metales pesados pueden desplazar elementos esenciales en los procesos metabólicos de los microorganismos del suelo, deteriorando las poblaciones microbianas y su actividad biológica [4, 8, 9]. Por otro lado, los metales pesados pueden inhibir la absorción de nutrientes esenciales por parte de las plantas, lo que afecta su crecimiento y desarrollo, daños en las células vegetales interfiriendo con los procesos metabólicos y fotosintéticos [13, 17].

De otro lado, los microorganismos del suelo desempeñan funciones esenciales para la liberación de nutrientes desde los fertilizantes hacia los cultivos [8, 9, 30]. Las bacterias

fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fósforo, por ejemplo, son cruciales para la fertilidad del suelo dado que aumentan la disponibilidad de estos nutrientes para aprovechamiento de las plantas [41]. Incluso después de su muerte, los microorganismos contribuyen a la fertilidad del suelo, ya que sus residuos representan entre el 30% y el 50% de la materia orgánica del suelo [8]. Una alta diversidad de comunidades microbianas es fundamental para mantener diversas funciones que beneficien los cultivos. Sin embargo, la presencia de metales pesados afecta negativamente a estas comunidades microbianas, comprometiendo la salud y la productividad del ecosistema agrícola y agravando los problemas derivados del uso excesivo de fertilizantes químicos sintéticos [9, 30].

La eficacia de los fertilizantes también es un desafío, debido a que la gestión de los fertilizantes aplicados sigue siendo subóptima [3]. Como resultado, las plantas utilizan sólo una pequeña porción del fertilizante aplicado, aproximadamente, entre el 20 y 50% para los fertilizantes fuente de nitrógeno, 15 y 20% para las fuentes de fosforo, 50 y 55% para fuentes de potasio y oligoelementos de 2 a 5% [10, 12]. El material restante, se desaprovecha en el medio ambiente a través de lixiviación, emisiones, fijación, esorrentía o utilización por microorganismos del suelo, lo que resulta en una menor fertilidad y pérdidas económicas [18, 19].

Una alternativa prometedora para mejorar la eficacia de los fertilizantes es el uso de componentes que estimulen la absorción de nutrientes y el desarrollo de mecanismos de defensa en las plantas contra el estrés por metales pesados [4, 8], los fertilizantes orgánicos han sido ampliamente estudiados y usados dado que desempeñan un papel vital al mejorar las interacciones entre las plantas y los microorganismos, aumentando la tolerancia de los cultivos al estrés por metales pesados al mantener el equilibrio iónico y neutralizar radicales tóxicos mediante la activación de antioxidantes y fitohormonas [6, 7, 12]. Por consiguiente, la combinación de fertilizantes orgánicos y sintéticos ha demostrado ser una estrategia efectiva para optimizar el uso de nutrientes y promover prácticas agrícolas más sostenibles [13, 16, 26, 28].

Un desafío de la mezcla de la fertilización orgánica y química surge, especialmente cuando los fertilizantes orgánicos, obtenidos comúnmente como subproductos industriales en forma de polvo, son aplicados en su presentación habitual. Esta forma física ocasiona pérdidas de nutrientes por volatilización, lixiviación y escorrentía. Para abordar estos problemas, se han propuesto enfoques como la mezcla de fertilizantes y la granulación [38]. Estos métodos mejoran el contacto entre los componentes y optimizan la liberación de nutrientes. La granulación, en particular, proporciona partículas de mayor volumen, lo que facilita una distribución más uniforme y una liberación controlada de nutrientes, superando las limitaciones de los fertilizantes en polvo [14]. En este sentido, la pelletización o granulación de estos abonos orgánicos sólidos facilita su transporte y aplicación, presentando una alternativa eficiente para prácticas agrícolas más sostenibles [15].

En este trabajo de grado, se formuló un fertilizante orgánico empleando como base orgánica el compostaje obtenido de subproductos de la caña de azúcar, cambiando su forma física a granular y aumentando su contenido nutricional con la incorporación de materias primas fuentes de nutrientes esenciales para cultivos de hortalizas. Dado su interesante contenido de materia orgánica y su bajo costo de obtención, este abono es empleado para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, sin embargo, su limitada participación nutricional limita su uso y viabilidad para aplicación en cultivos diferentes a la caña de azúcar [16]. En este sentido, uno de los objetivos de este trabajo fue enriquecer este abono con nutrientes esenciales para la fertilización en la etapa de producción de hortalizas; considerando que el creciente énfasis mundial en la seguridad alimentaria y las prácticas agrícolas sostenibles ha puesto de relieve estos cultivos, caracterizado por la aplicación extensiva de fertilizantes y la necesidad de riego frecuente [17].

Las materias primas fueron seleccionadas con la característica principal de ser de origen orgánico y proceder de procesos de obtención que no involucraran síntesis química como ocurre con las materias primas tradicionales. La eficacia del fertilizante fue evaluada en un cultivo piloto de tomate, los resultados obtenidos, como altura y diámetro de tallos, cantidad de flores y frutos, así como los pesos, fueron comparando con tratamientos sin aplicación y

con fertilización tradicional encontrando resultados favorables para la aplicación orgánica y mineral en hortalizas.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1 Planteamiento del problema:

El uso intensivo de fertilizantes químicos en la agricultura moderna ha sido una práctica común para satisfacer la creciente necesidad de alimentos a nivel mundial [12]. Sin embargo, esta práctica ha llevado a una serie de desafíos críticos que afectan tanto la productividad de los cultivos como la sostenibilidad ambiental. Los fertilizantes químicos, compuestos principalmente por urea, fosfato monoamónico, cloruro de potasio, óxidos y sulfatos, presentan una alta solubilidad [21]. Al aplicarse en los cultivos y entrar en contacto con la humedad del suelo, estos compuestos se disuelven rápidamente en iones como nitrato (NO_3^-), amonio (NH_4^+), fosfato (PO_4^{3-}) y potasio (K^+), entre otros. Esta rápida disolución puede provocar concentraciones excesivas de nutrientes cerca de las raíces, causando efectos adversos tanto para las plantas como para el ecosistema circundante [10, 28, 34].

La eficacia de estos fertilizantes puede verse comprometida por diversas condiciones del suelo, como pH inadecuado, baja capacidad de intercambio catiónico (CIC), estructura deficiente del suelo y la ausencia de microorganismos beneficiosos [40]. En tales condiciones, los iones de los fertilizantes no son completamente absorbidos por las plantas, siendo desplazados fuera del sitio de aplicación. Esto resulta en una pérdida significativa de nutrientes, contaminación ambiental y una menor eficiencia en el uso de los recursos agrícolas [12, 28].

En respuesta a estos desafíos, en el presente trabajo se propone el desarrollo de un abono orgánico sólido derivado de subproductos como la cachaza y la vinaza de los ingenios azucareros para mejorar las propiedades físicas y la fertilidad del suelo. No obstante, estos abonos orgánicos pueden tener un contenido nutricional limitado [34], lo que hace necesario complementarlos con fertilizantes químicos para satisfacer las necesidades nutricionales de los cultivos. Aunque los abonos orgánicos mejoran ciertas características del suelo, no

proporcionan suficientes microelementos esenciales como boro, magnesio, azufre y zinc, lo que obliga a aplicar grandes cantidades para igualar la efectividad de los fertilizantes químicos [42, 40].

Otro problema significativo es la forma física en polvo de estos abonos, que presenta varias desventajas en comparación con las formulaciones granulares. La aplicación de abono en polvo puede ser irregular debido a su tendencia a dispersarse con el viento o aglomerarse, dificultando una distribución uniforme. Además, es más susceptible a la volatilización y lixiviación de nutrientes. Este tipo de abono también puede contribuir a la compactación del suelo cuando se acumula en capas densas, afectando la aireación, permeabilidad y dificulta el acceso de las raíces a los nutrientes [44, 45, 46].

En general, mientras que los fertilizantes tradicionales ofrecen una solución rápida para la nutrición de las plantas, no están diseñados para mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo de manera sostenible, lo que tiene implicaciones adversas en la disponibilidad de nutrientes y la salud general del ecosistema del suelo. Este estudio busca abordar estos problemas a través de un enfoque integrado que combine las ventajas de los abonos orgánicos con la nutrición precisa proporcionada por los fertilizantes químicos, mejorando así tanto la salud del suelo como la eficiencia del uso de nutrientes.

Para enfrentar estos desafíos, esta tesis presenta el desarrollo de un fertilizante granular orgánico enriquecido con nutrientes esenciales, utilizando algunos subproductos industriales de la caña de azúcar como la cachaza y la vinaza. Este fertilizante granular no solo mejoraría la eficiencia en la aplicación y absorción de nutrientes, sino que también promovería la actividad microbiana del suelo, mejorando así la salud y la productividad del ecosistema agrícola. La investigación se centra en la formulación y evaluación de este fertilizante en un cultivo piloto de tomate, comparando su eficacia con fertilizantes tradicionales y sin aplicación, para demostrar su potencial como una alternativa sostenible y efectiva en la agricultura moderna.

2.2 Pregunta de investigación:

¿Cómo se puede formular y desarrollar un fertilizante granular que combine componentes orgánicos y minerales, utilizando subproductos de la caña de azúcar, para hortalizas, de manera que se optimice la actividad microbiana del suelo y se maximice la absorción de nutrientes esenciales?

3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

3.1 Objetivo general

Diseñar un fertilizante granular a base de abono orgánico obtenido de subproductos industriales de la caña de azúcar, enriqueciendo su composición a través de materias primas de origen orgánico fuentes de nutrientes, con el propósito de mejorar la absorción de nutrientes en cultivos de hortalizas.

3.2 Objetivos específicos

Determinar la formulación del fertilizante identificando los componentes a agregar al abono orgánico a través de su caracterización fisicoquímica y balance de materiales buscando obtener un contenido nutricional adecuado.

Implementar un método de fabricación del fertilizante granular empleando técnicas de mezclado, granulación y secado, buscando lograr una distribución homogénea y un producto final estable.

Realizar ensayos comparativos en cultivo experimental de tomate, evaluando la transferencia y absorción de nutrientes del fertilizante granulado mediante el desarrollo vegetativo y productivo del tomate comparando su efecto con tratamientos sin aplicación y fertilización tradicional.

4. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

Los fertilizantes son parte fundamental de la agricultura, estos ingredientes proporcionan los nutrientes esenciales para el crecimiento de los cultivos. Su clasificación general, se puede dar entre inorgánicos y orgánicos. Los inorgánicos, también conocidos como químicos, son aquellos que contienen fuentes concentradas de nutrientes y su composición la aportan materias primas obtenidas por proceso de fabricación química como el fosfato monoamónico, superfosfato triple, urea, nitrato de amonio, cloruro de potasio, sulfato de amonio. Por otro lado, están los fertilizantes orgánicos, también conocidos como abonos orgánicos, obtenidos en gran medida de desechos de la producción de alimentos y agricultura, si bien estos fertilizantes son fuente de algunos nutrientes, son preferidos por su aporte de materia orgánica necesaria para el correcto funcionamiento del suelo y desarrollo de los cultivos [25].

En esta revisión de la literatura, se explorarán diversos aspectos relacionados con la producción de fertilizantes de manera sostenible. La sección 4.1 aborda la eficacia en términos de crecimiento y cantidad de producto de los fertilizantes y el efecto de la materia orgánica en sus tasas de aprovechamiento y absorción. En la sección 4.2 se expone como puede ocurrir la presencia de algunos metales pesados en los cultivos debido a la aplicación de algunos fertilizantes. La sección 4.3 describe los beneficios de combinar la fertilización tradicional con aporte de materia orgánica en forma granular. Finalmente, la sección 4.4 explora el potencial de los subproductos del procesamiento de caña de azúcar como fuentes de materia orgánica para mejorar la eficiencia de los fertilizantes.

4.1 Eficacia de los fertilizantes por condiciones del suelo

A nivel mundial, el rendimiento anual de los cultivos supera los tres mil millones de toneladas; para satisfacer esta demanda agrícola se necesitan 187 millones de toneladas de fertilizantes cada año [34]. Estos insumos agrícolas, son los responsables de aumentar la producción de cultivos, desafortunadamente, su baja eficacia, dejan como consecuencias el

desaprovechamiento del 30 al 50% del fertilizante aplicado [35]. Las pérdidas comunes reportadas son del orden del 40 al 70% para el nitrógeno, del 80 al 90% del fósforo y del 50 al 70% del potasio [36]. En corroboración, se informó que los cultivos asimilan sólo entre el 50 y 60% de nitrógeno y potasio y entre el 10 y 25% de fosforo en el primer año, con una reducción adicional del 1 al 2% en los años siguientes lo que indica el bajo uso y eficacia de los fertilizantes aplicados [37].

Estas pérdidas agrícolas no sólo conllevan al desaprovechamiento de recursos valiosos, sino que también provocan la contaminación del aire, el agua y el suelo [4, 9]. El nitrógeno se transforma inicialmente en su forma de ion amonio (NH^+), al no ser asimilado por la planta de manera proporcional a su concentración en el suelo, se transforma en amoniaco (NH_3) y escapa al aire mediante volatilización, también el ion amonio puede transformarse en nitratos (NO_3) y seguidamente desnitrificarse en gases como el óxido nitroso (N_2O) y dinitrogeno (N_2) que igualmente se pierden en la atmosfera [20]. En el caso de los fertilizantes, se liberan iones fosfato (PO_4^{+3}), estos iones tienden a ser capturados o fijados por partículas del suelo como los óxidos de hierro y aluminio en suelos ácidos, también por calcio en suelos alcalinos. La concentración de fosforo disponible para las plantas tiende a limitarse dado que los iones tienen baja movilidad y permanecen cerca al sitio de aplicación [6]. En el caso del potasio, se forma iones de potasio (K^+), pudiendo ser adsorbidos por partículas de arcilla y materia orgánica lo que retiene el potasio reduciendo su disponibilidad para las plantas [38].

Los nutrientes disueltos en el agua del suelo también pueden ser transportados en el agua lluvia o el riego cuando se excede la capacidad de retención del suelo. Los nutrientes se infiltran y pueden alcanzar aguas subterráneas [1, 4]. Por otro lado, fluyen a la superficie y estos son arrastrados fuera del área de acción. Ambos fenómenos, conocidos como lixiviación y escorrentía, respectivamente, contaminan aguas superficiales y subterráneas contribuyendo al problema de eutrofización que causa la proliferación de algas y disminuye la calidad del agua [38].

Factores como la materia orgánica del suelo, retención de agua, pH, microorganismos, se han estudiado como esenciales para establecer la fertilidad del suelo y obtener un mejor aprovechamiento de los nutrientes [38, 41]. La materia orgánica se compone de una serie de moléculas que desempeñan un papel crucial en el transporte de sustancias a través del suelo e influyen en la actividad biológica del suelo. Estas moléculas, contienen ácidos carboxílicos y grupos OH fenólicos, los cuales pueden unirse fuerte y específicamente por sus grupos funcionales a una variedad de elementos cómo los nutrientes, [39].

A su vez, la materia orgánica influye en la estructura del suelo, su presencia permite el crecimiento y la morfología de las raíces de las plantas [41], el desarrollo de estas propiedades es vital para la absorción eficiente de nutrientes, condiciones desfavorables del suelo como una alta densidad aparente, compactación, sellado de superficie, deshidratación y aireación deficiente, puede provocar una estructura radicular deficiente y un desarrollo de biomasa deficiente. Otro factor que depende de la cantidad de materia orgánica es la acidez del suelo, la acidificación del suelo puede intensificarse bajo la disminución de la materia orgánica [40].

La materia orgánica del suelo juega un papel crucial para mejorar la capacidad de aprovechamiento de los nutrientes por partes de las plantas [17]. Algunos de los beneficios presentados con el aumento de la capacidad de intercambio catiónico, esto significa que el suelo puede retener más iones, adicionalmente, formación de agregados que mejora la estructura, aireación y drenaje [28]. A su vez, la materia orgánica aumenta la capacidad de retención de agua en el suelo, lo que reduce la lixiviación de nutrientes y asegura que permanezcas disponibles para las plantas durante periodos secos [42]. Como punto importante, incrementa la actividad microbiana dado que sirve como alimento de microorganismos del suelo como bacterias y hongos [7, 9, 41].

4.2 Metales pesados en algunos fertilizantes químicos

El aumento del contenido de metales pesados en los suelos tiene como causa, el rápido desarrollo de la industria y la agricultura [5, 6, 26]. Si bien los suelos tienen presencia natural y antropogénica de metales pesados; existen en pequeñas cantidades como resultado de los procesos de erosión de las rocas. Desafortunadamente, sus concentraciones han ido aumentando significativamente en los últimos años a raíz de la mala praxis en la aplicación excesiva de fertilizantes y/o pesticidas para satisfacer la producción mundial de alimentos [4, 5, 12, 7, 27]. La formulación de fertilizantes químicos se hace principalmente con sales de fosfato, nitrato, amonio y potasio [25, 28]. Las fuentes, especialmente las sales fosfatadas, están a veces asociadas con la presencia de trazas de metales pesados, como contaminantes de los fosfatos, debido a la naturaleza de las materias primas utilizadas y los procesos de fabricación [18, 29, 39]. En las materias primas empleadas, se encuentran trazas de metales pesados que, aunque en bajas concentraciones, se ha sugerido que pueden presentar bioacumulación con el tiempo debido a los procesos dinámicos en la química del suelo [41], y potencialmente ser translocados por las plantas [29, 32]. Además, en otros tipos de abonos químicos que utilizan fuentes de nitratos, se ha reportado la presencia de cadmio, presente como impureza en las materias primas. Asimismo, se ha indicado que el cromo, transmitido por el desgaste de equipos, y el níquel, presente en los catalizadores, pueden terminar en los fertilizantes y, consecuentemente, en los suelos [30, 31].

Los metales pesados son transmitidos por los fertilizantes a los cultivos, estos son absorbidos por las raíces de las plantas y transferidos a las partes comestibles de las cosechas [7, 18, 27], estudios consultados, reportaron la presencia de metales pesados en vegetales de alto consumo como las hortalizas, las concentraciones de Cd, Pb, Ni, Zn y Cu, eran considerables siendo un riesgo para la salud de las personas [31, 32]. En particular, grandes cantidades de metales pesados se acumulan en el sistema acuático y en el suelo, entrando en la cadena alimentaria incluso en bajas concentraciones, como el Pb y el Cd, que puede causar daños graves en el sistema nervioso y cardiovascular o provocar enfermedades crónicas como el cáncer y artritis. La acumulación excesiva de Cu y Zn también pueden perjudicar el cerebro,

corazón y páncreas, lo que provoca deshidratación y desequilibrio electrolítico en el cuerpo [26].

Los metales pesados también afectan los microorganismos del suelo, encontrando efectos adversos sobre el crecimiento y la diversidad de la comunidad microbiana y sus múltiples funciones ecológicas [33]. Los metales pesados pueden afectar el crecimiento microbiano al desnaturalizar proteínas, alterar las membranas celulares, inhibir la actividad enzimática y alternar la estructura del ADN, esto trae como consecuencia, la reducción de la biomasa microbiana. Los estudios ecotoxicológicos han demostrado que los metales pesados también pueden provocar la disminución de las poblaciones y la diversidad microbianas y cambiar la estructura microbiana [30].

Considerando la contribución de los fertilizantes químicos como una fuente importante de contaminación por metales pesados, continuar empleando materias primas tradicionales en el diseño de los fertilizantes, pone en peligro el desarrollo de la agricultura sostenible. El mundo se enfrenta a una gran presión para reducir el uso de fertilizantes químicos en la agricultura y una estrategia para reducir el consumo de fertilizantes sin comprometer la nutrición de las plantas, es incorporar el uso de componentes que sustituyan y a su vez estimulen los procesos de transformación de nutrientes para mejorar la absorción en los cultivos [25, 33].

4.3 Fertilización orgánica combinado y la revelación de la forma física granular

Durante los últimos 20 años, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de la ONU, ha sugerido la presencia de componentes en los fertilizantes que aumenten el rendimiento en los cultivos y los nutrientes sean aprovechados de manera eficaz [35]. De manera similar, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), ha recomendado la utilización de compostajes y fertilizantes químicos para mejorar de manera

sostenible la tasa de aprovechamiento y eficiencia de absorción de los nutrientes aplicados [40]. Este uso combinado, ha demostrado la posibilidad de reducir el aporte de fertilizantes sin limitar las proyecciones de rendimiento de los cultivos [42], esto se debe, a los efectos comprobados del compost que muestran mejoras en las propiedades del suelo, cómo la reducción de pérdida de nutrientes, la resistencia mejorada del suelo a escorrentías y erosión, mejora de la actividad biológica y capacidad de suministro de nutrientes [40].

Los residuos de procesos vegetales con contenidos orgánicos, se consideran materiales potenciales para la fabricación de fertilizantes, la economía circular se aplica cada vez más a la producción de fertilizantes y prioriza el reciclaje de materiales [34, 43]. Sumado a los beneficios a nivel estructural del suelo, los fertilizantes orgánicos favorecen el crecimiento de microbios beneficiosos en la zona de las raíces de las plantas. Estos microbios descomponen los fertilizantes para liberar los minerales que las plantas absorben cómo nutrientes para apoyar su crecimiento. Por lo tanto, el contenido microbiano en el suelo es un determinante de la eficiencia de los fertilizantes [34].

La forma tradicional de aplicación de enmiendas orgánicas y fertilizantes químicos puede tener riesgos en la pérdida de nutrientes, estudios han informado que su forma de aplicación, no satisfacen los requisitos del cultivo de forma sinérgica [44]. Para evitar estos inconvenientes y lograr una aplicación sostenible y eficiente, se han propuesto varios enfoques como hacer que los materiales orgánicos y químicos se mezclen en forma granular [42, 45]. La forma granular de los abonos, ofrece ventajas significativas en cuanto a la aplicación de los fertilizantes en campo, dado que esta forma física los convierte en más higienizados, es decir, no generan polución excesiva y dificultad de manipulación, económicamente transportables y esparcirles mediante aplicadores comerciales de fertilizantes [46].

4.4 Subproductos del procesamiento de caña de azúcar y su potencial en la industria de los fertilizantes

Cantidades considerables de residuos y subproductos agrícolas están siendo originados en el procesamiento de los cultivos y su generación incrementará con la creciente población mundial. En algunos países, estos subproductos se queman en campo abierto, algunos son aprovechados en la industria de los fertilizantes, o contribuyen a la producción de energía en las fábricas de procesamiento. A nivel mundial, la caña de azúcar es de los cultivos más importantes, su procesamiento, genera una serie de subproductos de potencial atractivo para la fabricación de fertilizantes dado su contenido de nutrientes, pero especialmente materia orgánica [47, 55, 56].

En Colombia, para el 2022, Asocaña reportó una producción de 23 millones de toneladas de caña de azúcar [48]. Del procesamiento de la caña para la obtención de azúcar y alcohol, se obtienen subproductos como la cachaza, formada por residuos sólidos del proceso de clarificación del jugo de caña y ricos en materia orgánica, calcio, fósforo y nitrógeno, con producciones de 30 kilos de cachaza por cada tonelada de caña que se muele. La vinaza por otro lado, un residuo líquido obtenido en las destilerías de alcohol, con producciones de 13 litros por cada litro de alcohol obtenido, con alto contenido de materia orgánica, potasio, azufre y calcio [49].

De la unión y compostaje de la cachaza, la vinaza y las cenizas de la quema del bagazo de caña, se obtiene un abono orgánico sólido en forma de polvo empleado en los ingenios azucareros como acondicionador de suelos dado su efecto mejorador de las propiedades físicas, químicas y biológicas. Estos materiales, incrementan la porosidad del suelo, disminuyen su densidad aparente, aumentan la capacidad de intercambio catiónico y permiten la transferencia de nutrientes esenciales, a su vez, su aporte de materia orgánica promueve la actividad biológica del suelo [50, 57].

5. METODOLOGIA

La metodología de este estudio se centró en el diseño, formulación, fabricación y evaluación de un fertilizante granular a partir de un abono orgánico elaborado de subproductos de la caña de azúcar, específicamente cachaza, vinaza, cenizas y bagazo, enriquecidos con nutrientes esenciales. El proceso metodológico se estructuró en varias etapas claves:

5.1 Necesidades nutricionales de las hortalizas

La definición de los requerimientos nutricionales para los cultivos de hortalizas se realizó consultando las curvas de extracción de nutrientes para cebolla, tomate, pepino, lechuga, pimentón y repollo [51, 52, 53]. El resultado de los nutrientes necesarios y sus cantidades promedio por hectárea, fueron documentados en la Tabla 1, estos contenidos fueron definidos por monitoreos de la absorción de nutrientes por las hortalizas en los estudios citados. De los resultados encontrados, se puede apreciar alta demanda en las hortalizas de nutrientes como calcio, magnesio, fósforo, potasio y nitrógeno, a su vez, contenidos de azufre, boro, cobre, zinc son fundamentales para el desarrollo agronómico de estos cultivos. Con estas definiciones y cantidades requeridas, se establecieron los nutrientes a enriquecer en el abono orgánico.

5.2 Caracterización del abono orgánico a enriquecer

Para obtener el contenido nutricional del abono orgánico, se realizó la consecución de una muestra de 15 kg de abono orgánico de ingenio azucarero del Valle del Cauca¹. Una muestra representativa del material fue enviada al laboratorio de análisis fisicoquímico de suelos para realizar evaluación y determinar su capacidad de satisfacer las necesidades nutricionales de los cultivos. Los análisis incluyeron la determinación del carbono orgánico total oxidable

¹ El abono orgánico mineral es aportado por ingenio azucarero del Valle del Cauca, sin embargo, no autoriza la divulgación de nombre técnico del producto.

(referente de la materia orgánica), macro y micro nutrientes, capacidad de intercambio catiónico (CIC), retención de humedad, utilizando técnicas de laboratorio como la metodología analítica Kjeldahl – Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167 para el nitrógeno, el contenido del fósforo total por colorimetría - NTC 234 y NTC 5167, el potasio por emisión atómica – NTC 202 y NTC 5167, al igual que el calcio, magnesio, silicio, zinc, cobre. Para el caso del boro se empleó colorimetría – NTC 1860 y 5167. También fueron reportados valores de pH de 8.37 determinados por potenciómetro - NTC 5167, densidad de 0.683 g/cm³ y retención de humedad de 85.84% por gravimetría – NTC 5167 y capacidad de intercambio catiónico de 42.29 cmol/kg por NTC 5167. Los resultados obtenidos de este análisis de laboratorio se presentan en la Tabla 1 junto con los nutrientes reportados por el ingeniero azucarero para el abono orgánico.

Tabla 1. Requerimientos nutricionales promedio para hortalizas [51, 52, 53] y análisis químicos del abono orgánico.

Nutriente	Requerimientos nutricionales	Reportado para el abono orgánico	Análisis químicos en laboratorio
Nitrógeno	60-175 kg/ha	0,68%	0,63%
Fósforo	40-100 kg/ha	1,50%	1,46%
Potasio	200-300 kg/ha	1,50%	2,12%
Calcio	800-1000 kg/ha	2,00%	1,90%
Magnesio	23-50 kg/ha	1,00%	0,90%
Azufre	10-20 kg/ha		0,04%
Boro	1.5-2.5 kg/ha		
Carbono orgánico		12%	11.9%

5.3 Evaluación de deficiencias nutricionales

Basándose en los requerimientos agronómicos para las hortalizas y la composición detectada en el abono orgánico en la Tabla 1, se constató que dicho abono carecía de nutrientes

esenciales como calcio, boro, magnesio, azufre, y presentaba niveles bajos de fósforo, potasio y nitrógeno con respecto a lo reportado en la literatura [51, 52, 53]. Esta interpretación llevó a la selección y definición de los nutrientes necesarios para el enriquecimiento y las materias primas adecuadas para complementar estos déficits nutricionales. En cuanto al análisis de propiedades físicas del abono orgánico, se encontró un contenido de materia orgánica relacionado con el Carbono Orgánico Total Oxidable (COOT) de 13.2%, su capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue de 42.29 cmol/kg, retención de humedad de 85.84%, indicando una capacidad relativamente alta para retener e intercambiar cationes, corroborando la capacidad de proporcionar nutrientes a las plantas de manera eficiente.

5.4 Selección de materias primas fuentes de nutrientes

La selección y definición de los nutrientes que necesitaban ser enriquecidos y las materias primas adecuadas se establecieron comparando los requisitos nutricionales de las hortalizas y los contenidos del abono orgánico. Se definieron el boro, magnesio, fosforo, calcio, potasio y silicio como nutrientes a enriquecer. A continuación, se detalla la metodología empleada para seleccionar las materias primas por cada nutriente:

5.4.1 Fuente de boro

La búsqueda de materias primas fuente de boro para la fabricación de fertilizantes expuso varias opciones comúnmente empleadas como el ácido Bórico, el bórax, la ulexita, el borato de Magnesio y el borato de zinc. En la Tabla 2 se comparan estas opciones según criterios cómo la concentración del boro, la forma de obtención y los nutrientes adicionales que pudieran aportar. La ulexita ofrece una mayor concentración de boro en comparación con el bórax y también es fuente de calcio, un nutriente de interés en la formulación del fertilizante. Las demás fuentes estudiadas, provienen de proceso de fabricación con síntesis química lo cual expone al fertilizante a contenidos no deseados como metales pesados que se puedan solubilizar o adquirir en los procesos de producción de estas materias primas [58]:

Tabla 2. Opciones de materia primas fuente de boro para fabricación de fertilizantes.

Materia prima	Composición	Contenido de boro	Nutrientes adicionales	Forma de obtención
Ácido Bórico	Mineral de boro en reacción con ácido sulfúrico	17.5%	No reporta	Síntesis química entre mineral y ácido
Bórax	Mineral de boro con procesos físicos de transformación	11%	No reporta	Formaciones sedimentarias creadas por evaporación de lagos
Ulexita	Mineral compuesto principalmente de boro, sodio y calcio	15%	Calcio	Evaporación de agua en lagos salinos y cuencas cerradas
Borato de Magnesio	Mineral de boro en reacción con ácido sulfúrico	19%	Magnesio	Mineral sometido disoluciones con soluciones ácidas
Borato de Zinc	Reacción química entre un oxido y un acido	30%	Zinc	Síntesis entre óxido de zinc y ácido bórico

5.4.2 Fuente de magnesio

La búsqueda de materias primas fuentes de magnesio para la fabricación de fertilizantes expuso varias opciones comúnmente empleadas, como la dolomita, la magnesita, el sulfato de magnesio, el cloruro de magnesio, la kieserita y el silicato de magnesio. En la Tabla 3 se comparan estas opciones según criterios cómo la concentración del magnesio, la forma de obtención y nutrientes adicionales que puedan aportar. La dolomita, magnesita, kieserita y silicato de magnesio se presentan como opciones favorables dado que su obtención se realiza por procesos netamente físicos. El silicato de magnesio presenta una mayor concentración de magnesio comparado con las demás materias primas y también es fuente de silicio, elemento de interés en la formulación del fertilizante dado sus beneficios en el suelo. Las demás fuentes estudiadas, provienen de proceso de fabricación con síntesis [59].

Tabla 3. Opciones de materia primas fuente de magnesio para fabricación de fertilizantes.

Materia prima	Composición	Concentración de magnesio	Nutrientes adicionales	Forma de obtención
Dolomita	Mineral compuesto por carbonato de calcio y magnesio	15%	Calcio	Minería a cielo abierto, seguidamente trituración y clasificación en tamaño de partícula
Magnesita	Mineral compuesto principalmente de carbonato de magnesio	28.8%	Físico	Proceso térmico de calcinación a altas temperaturas de mineral triturado
Sulfato de Magnesio	Compuesto químico obtenido de carbonato de magnesio y ácido	10%	Azufre	Síntesis entre la magnesita y el yeso, acompañados por ácido sulfúrico
Cloruro de magnesio	Compuesto químico obtenido de reacción entre un óxido y un ácido	12%	Químico	Reacción de magnesita o sulfato de magnesio con ácido clorhídrico
Kieserita	Mineral compuesto por sulfato de magnesio	18%	Azufre y Calcio	Depósitos minerales, soluciones salinas de sulfato de magnesio
Silicato de magnesio	Mineral natural de magnesio y silicio	40%	Silicio	Fuentes naturales de rocas

5.4.3 Fuente de fósforo

En esta búsqueda se encontraron opciones como el superfosfato simple, el fosfato monoamónico, la roca fosfórica, el fosfato diamónico y fosfato de calcio; listadas en la Tabla 4. Se encontró que la mayoría de las materias primas emplean la roca fosfórica con fuente de partida y es mezclada con ácidos una vez se tritura para obtener formas más asimilables de fósforo. Bajo la consideración de seleccionar materias primas libres de procesos químicos, la roca fosfórica su elegida como la fuente de fósforo para el enriquecimiento del fertilizante, considerando adicional los aportes de calcio, silicio y carbono orgánico [60]:

Tabla 4. Opciones de materia primas fuente de fósforo para fabricación de fertilizantes.

Materia prima	Composición	Concentración de fosforo	Nutrientes adicionales	Forma de obtención
Superfosfato simple	Roca fosfórica en mezcla con ácido	16%	Calcio, Azufre, Magnesio	Reacción química entre roca fosfórica y ácido sulfúrico
Fosfato monoamónico	Roca fosfórica en mezcla con ácido y amoniaco	52%	Nitrógeno y azufre	Reacción química de ácido fosfórico y amoniaco
Roca fosfórica	Minerales de fosfatos de calcio	30%	Calcio, Silicio, Carbono Orgánico	Extracción de minería a cielo abierto
Fosfato diamónico	Roca fosfórica en mezcla con ácido y amoniaco	46%	Nitrógeno y azufre	Reacción química de ácido fosfórica y amoniaco
Fosfato de calcio	Roca fosfórica en mezcla con ácido y amoniaco	39%	Calcio	Ácido fosfórico producto de la roca fosfórica y sales de calcio

5.4.4 Fuente de calcio

La búsqueda de materias primas fuentes de calcio para la industria de los fertilizantes, expuso el carbonato de calcio, dolomita, yeso agrícola, cloruro de calcio, nitrato de calcio, fosfato de calcio como alternativas. En la Tabla 15 se comparan estas opciones según criterios como la composición de calcio, nutrientes adicionales que pudiesen aportar, la forma de obtención. Se encontró algunas materias primas emplean la roca caliza como fuente de partida y es mezclada con ácidos una vez se tritura para obtener formas más asimilables de calcio. Bajo la premisa de seleccionar materias primas libres de procesos químicos, se eligió el yeso agrícola como la fuente de calcio para el enriquecimiento del fertilizante, considerando además sus aportes de azufre. Este nutriente fue seleccionado para el enriquecimiento debido a que su aporte garantiza los requerimientos necesarios, sin necesidad de recurrir a otra fuente que lo proporcione. [61]:

Tabla 5. Opciones de materia primas fuente de calcio para fabricación de fertilizantes.

Materia prima	Composición	Concentración de calcio	Nutrientes adicionales	Forma de obtención
Carbonato de Calcio	Mineral de calcio	56%	No suele tener nutrientes diferentes	Minería a cielo abierto de roca caliza triturada
Dolomita	Mineral de calcio y magnesio	30%	Magnesio	Minería a cielo abierto de roca caliza triturada
Yeso Agrícola	Mineral de sulfato de calcio	23%	Azufre	Depósitos naturales
Cloruro de Calcio	Salmueras subterráneas y agua de mar	77%	Magnesio	Evaporación y cristalización, también por síntesis química
Nitrato de Calcio	Nitrato de amonio con carbonato de calcio	24%	Nitrógeno	Reacción química
Fosfato de Calcio	Tratamiento de roca fosfatídicas con ácido sulfúrico	38%	Fosforo	Reacción química

5.4.5 Fuente de potasio

Las fuentes de potasio presentaron alternativas como el cloruro de potasio, el sulfato de potasio, el nitrato de potasio y la leonardita activada con hidróxido de potasio. En la Tabla 6 se comparan las concentraciones de potasio, la forma de obtención y nutrientes adicionales. Se encontró que algunas materias primas emplean el mineral de cloruro de potasio como fuente primaria de potasio y eran mezclados con sulfatos y ácidos para obtener formas más asimilables de potasio. Bajo la consideración de seleccionar materias primas libres de procesos químicos y con contenidos orgánicos, la Leonardita fue elegida como fuente de potasio, considerando adicional los aportes de calcio y ácidos húmicos y fúlvico [62, 63].

Tabla 6. Opciones de materia primas fuente de potasio para fabricación de fertilizantes.

Materia prima	Composición	Concentración de potasio	Nutrientes adicionales	Forma de obtención
Cloruro de Potasio	Rocas de sal	60%	No reporta	Minería a cielo abierto, molienda de rocas
Sulfato de Potasio	Cloruro de potasio con sulfato de magnesio y ácido sulfúrico	50%	Azufre	Reacción química
Nitrato de potasio	Cloruro de potasio y nitrato de calcio	13%	Nitrógeno	Reacción química
Leonardita activada	Mineral de origen orgánico	15%	Calcio, Ácidos húmicos y fúlvicos	Descomposición de materia orgánica

5.5 Balance de masas para definición de cantidad de materias primas

La dosis de las materias primas para el enriquecimiento del abono, fueron determinadas a través de un balance de masas. La definición de las cantidades se genera de manera integral, dado que su sumatoria define el grado de concentración de los nutrientes, esto impide que se determinen de manera individual. Para el caso de la ulexita, inicialmente, se deben determinar los aportes de los nutrientes garantizados, se consulta en la ficha técnica suministrada por el proveedor, los contenidos de boro y calcio, encontrando que son 15% de B y 15% de CaO. Seguidamente, se define el valor objetivo del nutriente, de acuerdo con las recomendaciones nutricionales de las hortalizas, se requiere de 1.5 a 2.5 kg de boro por cada hectárea a fertilizar.

- **Para aplicar 2.5 kg de boro por hectárea:**

$$\text{Cantidad de Ulexita } x \text{ hectarea: } \frac{2.5 \text{ kg de B}}{15\% \text{ B}} = 16.6 \text{ kg/hectarea}$$

En el caso del magnesio, para hortalizas se sugiere de 30 a 50 kg por hectárea. La materia prima seleccionada fue el silicato de magnesio, de acuerdo con consulta en ficha técnica por proveedor, se determinó un aporte del 31% de MgO. Similar al cálculo realizado para la Ulexita, se realiza la división del requerimiento nutricional entre la concentración del nutriente, encontrando la cantidad de materia prima a aplicar para lograr el requerimiento:

- **Para aplicar 50 kg de MgO por hectárea:**

$$\text{Cantidad de silicato por hectárea: } \frac{30 \text{ kg de MgO}}{31\% \text{ MgO}} = 161.3 \text{ kg/hectárea}$$

Para el potasio, el requerimiento agronómico en las hortalizas es de 200 a 300 kilos por hectárea, la materia prima seleccionada fue la Leonardita activada con hidróxido de potasio, de acuerdo con especificación técnica, el aporte de K₂O del 15%. La división de la cantidad de nutriente requerido por la concentración de la materia prima indica la cantidad de materia prima a aportar:

- **Para aplicar 300 kg de K₂O por hectárea:**

$$\text{Cantidad de leonardita por hectárea: } \frac{300 \text{ kg de K}_2\text{O}}{15\% \text{ K}_2\text{O}} = 2.000 \text{ kg/hectárea}$$

En el caso del fósforo, el requerimiento agronómico en las hortalizas es de 40 a 100 kg por hectárea, la materia prima seleccionada fue la Roca Fosfórica, de acuerdo con especificación técnica, el aporte de P₂O₅ fue de 30%:

- **Para aplicar 100 kg de P₂O₅ por hectárea:**

$$\text{Cantidad de Roca por hectarea: } \frac{100 \text{ kg de P}_{2}\text{O}_{5}}{30\% \text{ P}_{2}\text{O}_{5}} = 333 \text{ kg/hectarea}$$

Para el calcio, el requerimiento agronómico en las hortalizas es de 800 a 1000 kg por hectárea, la materia prima seleccionada fue el Yeso Agrícola, de acuerdo con especificación técnica, el aporte de calcio es de 25%. Adicionalmente, se tienen materias primas como la Ulexita, la Roca Fosfórica, y el abono orgánico, complementariamente al nutriente definido de aporte, estas materias primas son fuentes de calcio, estas concentraciones se suman en el balance para obtener el valor final de calcio. Inicialmente, se determina el calcio aportado por la Roca Fosfórica, de acuerdo con especificaciones técnicas es del 43%, definidos los 333 kg del aporte para el fosforo, se tiene 143.2 kg. De la misma forma se determina el calcio aportado por la Ulexita, 15% de CaO en 16.6 kg equivalen a 2.5 kg de CaO y finalmente el aportado por el abono orgánico, con 2% de CaO reportado equivale a 2 kilos de CaO. Realizando el ajuste de cantidades se obtiene una necesidad de 650 kg de CaO:

- **Para aplicar 650 kg de CaO por hectárea:**

$$\text{Cantidad de Yeso por hectarea: } \frac{650 \text{ kg de CaO}}{25\% \text{ CaO}} = 2.600 \text{ kg/hectarea}$$

Para la definición de la materia orgánica, se seleccionan fuentes como Ácidos húmicos y fúlvicos, con aporte del 33.2% de Carbono Orgánico Total Oxidable (COOT), Leonardita con aporte de Acido Húmico del 60% y el abono orgánico a enriquecer con aporte del 12%. Se encontraron concentraciones de 20% abono orgánico, 7% Ácidos Húmicos y Fúlvicos para lograr un aporte del 12% en el COOT desde el fertilizante diseñado.

Una vez definidas las cantidades de materias primas son consolidadas en la Tabla 7 para definir la formulación del fertilizante a emplear.

Tabla 7. Composición de materias primas definidas para formulación del fertilizante.

Materia prima	kg MP/Kg producto
Roca fosfórica	333
Ulexita	16,6
Bentonita	300
Silicato de magnesio	161
Abono orgánico	1500
Leonardita	2000
Yeso agrícola	2600
Ácido húmicos y fúlvicos	500

5.6 Consecución de suelo para cultivo experimental

Para definir la dosis del fertilizante aplicar y realizar el cultivo experimental de tomate. Se recolectaron 100 kg de suelo en el municipio de Restrepo, Valle del Cauca (3°49'54.3"N 76°31'02.8"W), donde se encuentra ubicado un invernadero dedicado principalmente al cultivo de hortalizas, con especial enfoque en el tomate de guiso. Muestras de suelo fueron tomadas de diferentes áreas dentro del invernadero y enviadas al laboratorio de análisis fisicoquímico de suelos. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de laboratorio de análisis fisicoquímico para suelo de estudio.

Cultivo: tomate de guiso		Rangos		
Textura	Franco arenosa arcillosa	mínimo	máximo	Clasificación
pH	5,3	5,6	6,8	Fuertemente ácido
MO	4,80%	7,01%		Bajo
CO	2,78%	4,07%		Bajo
N	54	80,5	144,9	Deficiente
P	17,06	20	40	Deficiente
K	0,13	0,26	0,52	Deficiente
Ca	8,8	3	6	Exceso
Mg	2,39	1,2	2,4	Óptimo
Na	0,14			
Al	0,63			

S	59,05	mg/kg	10	15	Exceso
Fe	105,25		20	40	Exceso
Mn	39,28		10	30	Exceso
Cu	6,11		1,6	3,2	Exceso
Zn	10,09		3	5,4	Exceso
B	0,83		0,3	0,6	Exceso

En general, se encuentra un suelo con textura franco-arenosa arcillosa, con moderada capacidad de retención de agua, de moderada a baja pérdida de nutrientes por lixiviación, moderada a alta disponibilidad de nutrientes para las plantas. También se evidencia un suelo con bajo contenido de carbono orgánico, pH fuertemente ácido, deficiencia en nutrientes esenciales y exceso alguno de ellos tal como se aprecia.

Los análisis realizados permitieron determinar las propiedades del suelo, incluyendo la textura, y los niveles de materia orgánica y nutrientes esenciales. Los resultados indicaron que el suelo era de tipo franco arenoso arcilloso, con un bajo contenido de materia orgánica y deficiencias en elementos cruciales como fósforo, potasio y magnesio, entre otros micronutrientes. Esta caracterización del suelo confirmó que era ideal para la aplicación de un fertilizante enriquecido que pudiera compensar estas deficiencias y mejorar la disponibilidad de nutrientes y carbono orgánico.

5.7 Definición de plan de fertilización de tomate

En colaboración con un ingeniero agrónomo de la empresa Colinagro SA, se estableció un plan de fertilización específico para el cultivo de tomate, adaptado a las características del suelo y al perfil nutricional proporcionado por el fertilizante desarrollado. Este plan de fertilización y los tratamientos aplicados en el experimento se documentan en la Tabla 9. Considerando un suelo bajo en materia orgánica y deficiencia de nutrientes esenciales, se define 15 gr por planta para las primeras dos semanas de aplicación, incremento a 30 gr por planta para cuarta y sexta semana, 45 gr para la semana octava, decima y duodécima. Se

cuenta con tratamiento testigo para el cual no se realizó aplicación de fertilizante, sólo riego y retiro de maleza como al demás tratamiento.

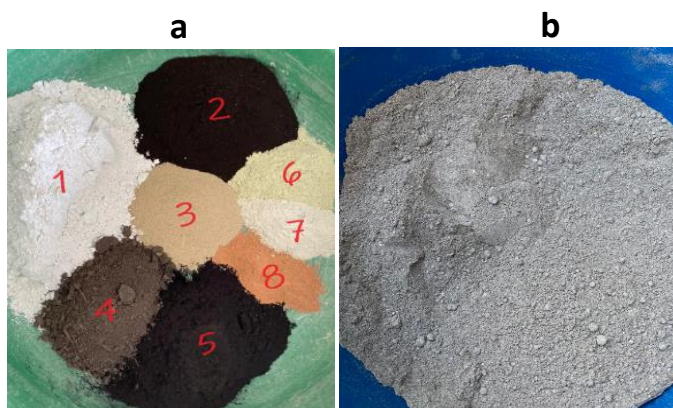
Tabla 9. Plan de fertilización y tratamientos para cultivo experimental de tomate.

Fecha	Semana	Días	Tratamiento (gramo fertilizante por planta de tomate)		
			Tradicional	Orgánica	Orgánica aumentada
25 al 30 dic 2023	0	7	15	15	18
8 al 13 ene 2024	2	14	15	15	18
22 al 27 ene 2024	4	21	30	30	36
5 al 10 feb 2024	6	28	30	30	36
19 al 24 feb 2024	8	35	45	45	54
4 al 9 mar 2024	10	42	45	45	54
18 al 23 mar 2024	12	49	45	45	54
Total	12	49	225	225	270

5.8 Granulación del abono orgánico enriquecido con materias primas

En el proceso de fabricación del fertilizante, se prepararon las cantidades de materias primas definidas en la formulación logrando producir 5 kg de fertilizante granular. Las materias primas fueron pesadas en una balanza de precisión, como se muestra en la Figura 1.a, incluyendo Ulexita (1), Leonardita (2), Roca Fosfórica (3), Abono orgánico (4), Ácidos húmicos y fúlvicos (5), Silicato de Magnesio (6), Yeso Agrícola (7) y Bentonita (8). Para asegurar la homogeneidad del fertilizante y la distribución adecuada de los nutrientes, se mezclaron manualmente utilizando una espátula y realizando movimientos circulares durante 10 minutos, hasta obtener una mezcla de color uniforme, como se documenta en la Figura 1.b.

Figura 1. (a) Materias primas para el fertilizante. (b) Mezcla de materias primas.



Una vez obtenida la mezcla adecuada de los componentes del fertilizante, se procedió a dividirla en porciones de 500 gramos para llevar a cabo el proceso de granulación utilizando un disco rotatorio. Este disco, con un diámetro de 1 metro e inclinado a 45 grados, facilitó la formación de los gránulos. Para mejorar la aglutinación de los componentes, se añadió una solución de agua al 5% de melaza (p/p), equivalente a 125 mL de líquido por porción de fertilizante. La solución se distribuyó uniformemente sobre la mezcla mediante boquillas pulverizadoras, optimizando la cohesión de los ingredientes para formar gránulos de manera eficiente. La figura 2 ilustra la granulación en acción en el disco rotatorio. Este proceso se repitió diez veces con las porciones de 500 gramos, acumulando un total de 5 kilogramos de fertilizante granulado.

Figura 2. Granulación de fertilizante en disco rotatorio con aplicación de solución líquida para aglutinar



5.9 Estabilidad física del grano

5.9.1 Humedad

El porcentaje de humedad garantiza la estabilidad física de los fertilizantes. En el caso de los fertilizantes orgánicos, se recomienda mantener humedades entre 3% y 6%. En el presente trabajo, para garantizar este nivel de humedad, los gránulos se secaron utilizando un método natural: exposición a la luz solar directa durante 48 horas y secado a temperatura ambiente, con temperaturas que oscilaron entre 26°C y 34°C, asegurando la pérdida de humedad y preservando la calidad del fertilizante, y siendo un método económico de secado.

Después del secado, se determinó la humedad de los gránulos utilizando un analizador de humedad AXIS-ATS 210 Lexus. La técnica consistió en colocar una muestra representativa de 4.0 gramos de material en la bandeja interna del instrumento. El equipo incorpora una resistencia térmica y una balanza, donde se mide la masa húmeda y posteriormente la masa seca, permitiendo calcular el porcentaje de pérdida de humedad.

Los valores de humedad encontrados para 5 muestras tomadas de diferentes partes del fertilizante diseñado arrojaron un promedio de $3.1\% \pm 0.2\%$.

5.9.2 Tamaño de partícula

Para garantizar el tamaño de partícula de los gránulos del fertilizante, se utilizó un conjunto de tamices con mallas N° 5 (4.0 mm) y N° 8 (2.0 mm) para clasificar los gránulos. Este paso garantizó una distribución uniforme del tamaño de los gránulos y permitió eliminar aquellos que no cumplían con las especificaciones requeridas. Los gránulos que no pasaban la prueba de tamaño fueron reprocesados mediante maceración y granulación hasta obtener el tamaño adecuado. La Figura 3 muestra el fertilizante final granulado y clasificado según el tamaño de partícula.

5.9.3 Dureza

La estabilidad física de los gránulos obtenidos se definió en función de la dureza final del producto. Para la medición de esta propiedad se utilizó un durómetro marca LUTRON modelo FR5120 de punzón el cual permitió determinar la fuerza de los gránulos al almacenamiento, manipulo y mezcla física. La técnica de medición consistió en seleccionar 15 gránulos de fertilizantes que conserven similitud en su tamaño de partícula. Los gránulos se posicionan en la base del equipo el cual genera una fuerza vertical hasta fracturar el gránulo reportado dicho valor. Estos valores fueron tabulados en la Tabla 10, arrojando un valor promedio de 2.04 kgf/in² de dureza. Para los gránulos de fertilizantes, se tiene establecido que valores de 2.0 a 3.0 kgf/in² son ideales y cumplen con lo requerido para garantizar estabilidad física del producto.

Tabla 10. Resultados de medición de dureza en los gránulos de fertilizante diseñado.

Muestra	Dureza [kgf/in ²]	Muestra	Dureza [kgf/in ²]
1	1,8	9	2,5
2	2,1	10	2,3
3	1,7	11	2,1
4	1,9	12	2
5	2,3	13	2,1
6	2	14	2,3
7	1,9	15	1,9
8	1,7	promedio	2,04

5.10 Resultado de análisis químico del fertilizante granulado

La corroboración del resultado de enriquecimiento se presenta en la Tabla 11 donde se logra evidenciar las concentraciones de nutrientes en el fertilizante fabricado. Encontramos que valores de Calcio (CaO), Magnesio (MgO), Azufre (S), Fósforo Total (P₂O₅), Boro (B) y Potasio (K₂O) se han incrementado producto del enriquecimiento y corresponden a las concentraciones porcentuales definidos en la formulación del fertilizante.

Figura 3. Fertilizante granulado con tamaño de partícula de 2 a 4 mm y dureza de 2 kgf/in².



Tabla 11. Resultados de laboratorio de análisis fisicoquímicos para fertilizante granulado

Parámetro evaluado	Concentración	Unidad
Nitrógeno Total (N)	1.5	%
Fósforo Total (P₂O₅)	4.3	%
Potasio Total (K₂O)	2.0	%
Carbono orgánico	13.2	%
Calcio (CaO)	13.4	%
Magnesio (MgO)	3.0	%
Silicio Total (SiO₂)	9.66	%
Boro (B)	4.9	%
Azufre	3.2	%
pH	9,05	
CIC	28,1	cmol/Kg
Porcentaje de Cenizas	61,59	%

5.11 Evaluación del fertilizante en cultivo experimental de tomate

El estudio de la eficiencia del fertilizante se llevó a cabo mediante un diseño experimental. Se seleccionaron tomates de la variedad Roble F1, obtenidos del Plantuladero El Rancho en

el municipio de Candelaria, Valle del Cauca. Estas plántulas tenían una edad de dos semanas desde su germinación al inicio del experimento.

El objetivo del diseño experimental fue evaluar la eficacia del fertilizante granulado de base orgánica en el rendimiento del cultivo tratado. Para esto, se fijaron las siguientes condiciones:

Tratamientos:

T1: Control (testigo para establecer diferencias porcentuales de los tratamientos)

T2: Aplicación de fertilizante químico tradicional

T3: Aplicación de fertilizante orgánico diseñado

T4: Aplicación de fertilizante orgánico diseñado aumentado 20%

Variables medidas:

- Altura y diámetro de los tallos
- Cantidad de flores
- Rendimiento de los frutos (peso y número)

Diseño experimental: Bloques completos al azar en huerta de 5 x 1 mts.

Número de repeticiones: 4 bloques, 4 réplicas.

Procedimiento:

1. Preparación del suelo: Se realiza la aplicación de 100 kilos de tierra obtenido de cultivos de hortalizas.

2. Aplicación de tratamientos: En la semana 0, se aplican las dosis presentadas en la Tabla 10; 15 gramos de fertilizante tradicional para T2, 15 gramos de fertilizante orgánico diseñado para T3, 18 gramos de fertilizante diseñado para T4. Las siguientes aplicaciones se realizan en intervalos de dos semanas bajo la especificación presentada en la tabla en mención.
3. Plantación de tomates: Las 16 plantulas fueron seleccionadas con la característica de tener misma altura, mismo diámetro de tallo y similar cantidad de hojas.
4. Mantenimiento del cultivo: Se realizó riego diario de las plantulas dadas las condiciones de humedad relativa de la huerta en horario de 7 am y 5 pm, adicionalmente, se realizó semanalmente de forma manual el retiro de hiervas no deseadas.
5. Recolección de datos: La altura de los tallos se midieron en intervalos de dos semanas con una cinta métrica, conjuntamente se midieron los diámetros de los tallos. A partir de la semana 5 se inició el conteo de flores de manera semanal, y a partir de la semana 8 se observaron los primeros frutos de tomate. Finalizada la semana 12, los tomates fueron pesados en función del tratamiento. Los datos fueron registrados para seguidamente análisis de la información.

Representatividad:

El diseño experimental realizado con cultivo de tomate a pequeña escala tuvo como objetivo fundamental comparar el efecto del fertilizante diseñado, la fertilización tradicional y los tratamientos sin aplicación de fertilizantes. Este enfoque permite evaluar de manera precisa y controlada las diferencias en el crecimiento y desarrollo de las plantas bajo condiciones uniformes de siembra.

Al incluir tres grupos (fertilizante diseñado, fertilización tradicional y sin aplicación), se logra una comparación directa de los efectos de cada tratamiento sobre el crecimiento y grosor de tallos, cantidad de flores y frutos, y peso de estos. Esto permite identificar cuál de los tratamientos ofrece una respuesta más positiva en términos de rendimiento y calidad del cultivo.

Variabilidad del Suelo: Se realizó un análisis previo del suelo para asegurar la homogeneidad de los bloques definidos. El análisis fisicoquímico detallado de los suelos, presentado en la Tabla 9, garantiza que las condiciones iniciales fueran consistentes en todas las áreas experimentales.

Condiciones climáticas: El experimento se llevó a cabo en Puerto Tejada, Cauca, una región caracterizada por un clima tropical. Durante los meses del experimento, las condiciones climáticas incluyeron una humedad relativa del 65%. Las temperaturas promedio dentro del invernadero fueron de 32°C, con máximas de 37°C y mínimas nocturnas de 18°C. Las precipitaciones fueron esporádicas entre diciembre y marzo, indicando una estación de verano con una temporada seca.

Limitaciones:

Condiciones específicas del sitio: Los resultados pueden ser específicos del sitio del experimento y no necesariamente aplicables a otras condiciones de suelo y clima.

Fenómenos climáticos: La región puede ser susceptible a fenómenos climáticos extremos como el fenómeno de El Niño, que puede alterar los patrones normales de lluvia y temperatura.

La distribución en el invernadero se realizó manteniendo una distancia de 30 cm entre cada plántula y dos hileras separadas entre sí por 70 cm. El riego se efectuó de manera tradicional utilizando una regadera de jardinería, con una frecuencia de dos veces al día, específicamente a las 7 a.m. y a las 5 p.m. En la Figura 4 se muestra el estado del cultivo en la semana cero, con plántulas que alcanzaban una altura promedio de 14 cm y un diámetro de tallo de 2 mm.

Siguiendo el plan de fertilización y tratamientos establecidos previamente (Tabla 9), se monitorizaron variables como la altura, el diámetro del tallo, la cantidad de flores, y la cantidad y peso de los frutos cada dos semanas. Las Figuras 5 y 6 muestran registros fotográficos comparativos tomados para algunas de las plantas después de seis semanas de trasplante, a su vez, para algunos de los resultados de la producción de frutos al final del período de estudio.

Figura 4. (a) Cultivo plántulas recién trasplantadas (b) Cultivo semana 12 crecimiento máximo de plántulas.



Figura 5. Comparativo de tomates semana 10, (a) sin aplicación, (b) fertilización tradicional, (c) orgánica, (d) orgánica aumentada

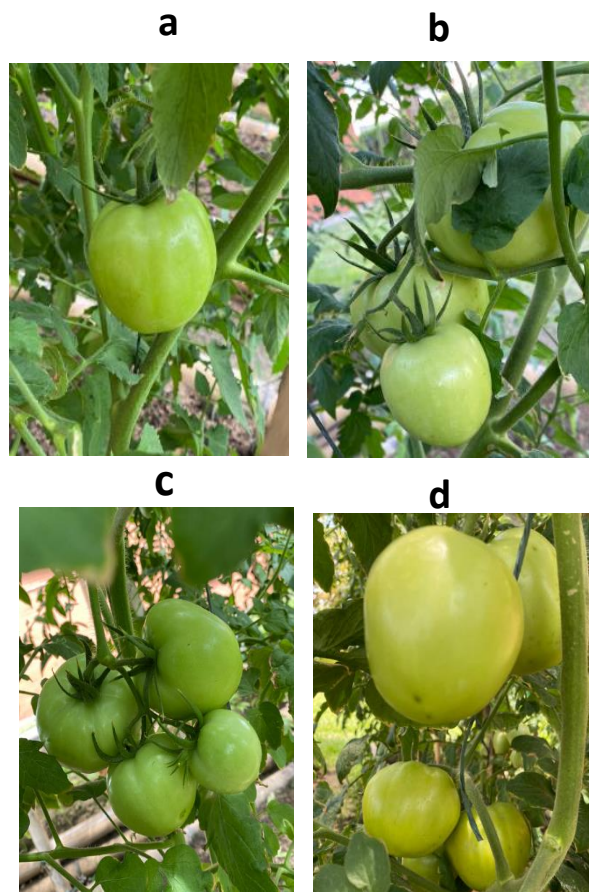


Figura 6. Tomates cosechados semana 12 para tratamientos (a) sin aplicación, (b) fertilización tradicional, (c), aplicación orgánica, (d) orgánica aumentada



6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 Enriquecimiento del abono orgánico y definición de materias primas

De acuerdo con las necesidades agronómicas de las hortalizas, y específicamente del cultivo de tomate, se define enriquecer en el abono orgánico nutrientes como el fósforo, potasio, calcio, magnesio, boro y azufre, adicionalmente, se adicionan ácidos húmicos, fúlvicos y silicio para lograr obtener contenidos minerales y orgánicos.

Las materias primas seleccionadas, fueron elegidas considerando el contenido del nutriente, la forma de obtención y los procesos productivos involucrados, a su vez, aportes adicionales de nutrientes que se logran obtener con su participación en el enriquecimiento. En este sentido, fue seleccionada la Ulexita como fuente de boro, la Roca Fosfórica como fuente de fósforo, el Silicato de Magnesio como fuente de magnesio y silicio, la Leonardita como fuente de potasio, también por contenidos orgánicos presentes, el Yeso Agrícola como fuente de calcio y azufre, finalmente, la Bentonita como agente aglutinante y Ácidos Húmicos y Fúlvicos para aportes orgánico junto al Abono Orgánico. En la obtención de estas materias primas, son empleados procesos físicos como la molienda, trituración y clasificación de tamaño de partícula.

Como resultado se obtiene la formulación que contenía 13% de calcio, 5% de boro, 4% de fósforo, 3% de magnesio, 3% de azufre, 2% de potasio, junto con un 13% de carbono orgánico y un 9% de silicio, estos contenidos nutricionales fueron confirmados mediante análisis fisicoquímicos en el laboratorio Agrosil, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 12.

6.2 Granulación de abono orgánico enriquecido

El abono orgánico tradicionalmente se obtiene y emplea en forma de solido polvo con un contenido de humedad en un rango del 18% al 25%. Esta presentación física genera retos en su aplicación dada la dificultad para realizar mezcla física con fertilizantes granulados, aplicación uniforme en áreas de gran dimensión, volatilización, afectaciones en la salud de los trabajadores y limitación en sistemas de dosificación.

En respuesta a estos retos, se desarrolló un fertilizante granular con tamaño de partícula en un rango de 2.0 a 4.0 mm, dureza promedio de 2 kgf/in² y un contenido de humedad del 3.0%. Estas propiedades físicas permiten confirmar la estabilidad física del granulo formado, presentando un producto con capacidad de resistir mecánicamente a aplicaciones en campo y tamaño de partícula requerido para mezcla física con fertilizantes granulados.

6.3 Altura de las plantas como función del tratamiento

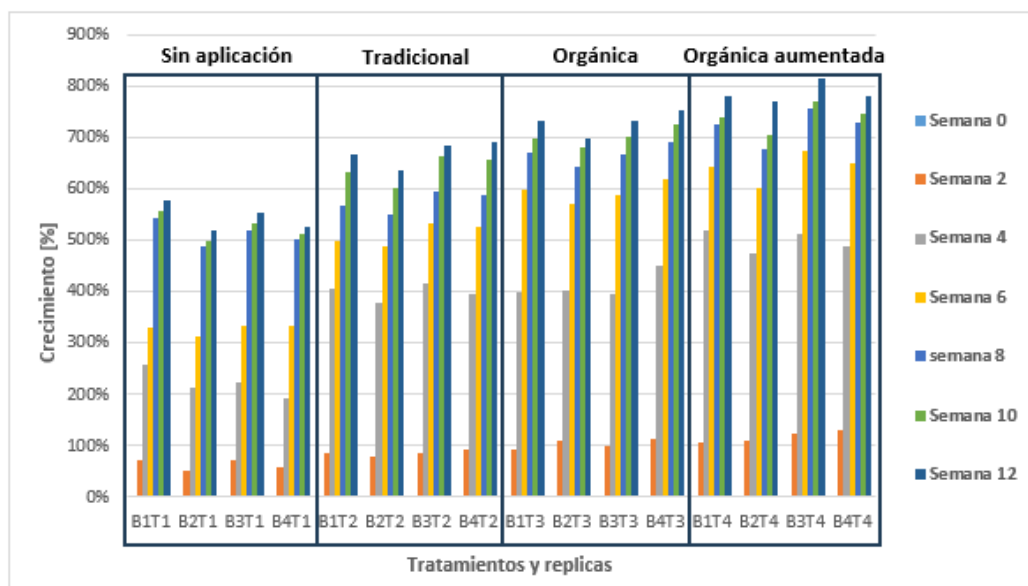
Las mediciones de la altura de los tallos se realizaron cada dos semanas utilizando una cinta métrica. Estas observaciones fueron registradas y presentadas en la Tabla 13, adicionalmente, los datos de crecimiento porcentual, empleando la altura inicial de las plantas en el momento del trasplante (Semana 0) son mostrados en la Figura 7.

Tabla 11. Registro de mediciones de alturas de los tallos en centímetros para los 4 tratamientos, 4 bloques y durante las 12 semanas del experimento.

Semana	Fecha medición	T1 (Sin aplicación)				T2 (Tradicional)			
		B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
0	25 al 30 dic 2023	15	15	15	15	15	15	15	15
2	8 al 13 ene 2024	24	24	25	24	28	28	27	28
4	22 al 27 ene 2024	50	49	47	44	76	74	75	72
6	5 al 10 feb 2024	60	64	63	65	90	91	92	91
8	19 al 24 feb 2024	90	91	90	91	100	101	101	100
10	4 al 9 mar 2024	92	93	92	92	110	109	111	110

12	11 al 16 mar 2024	95	96	95	94	115	114	114	115
Semana	Fecha medición	T3 (Orgánica)				T4 (Orgánica aumentada)			
		B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
0	25 al 30 dic 2023	15	15	15	15	15	15	15	15
2	8 al 13 ene 2024	29	33	30	31	30	33	31	34
4	22 al 27 ene 2024	75	78	75	80	90	89	86	86
6	5 al 10 feb 2024	105	104	104	105	108	109	109	109
8	19 al 24 feb 2024	116	115	115	115	120	121	120	121
10	4 al 9 mar 2024	120	121	121	120	122	125	122	123
12	11 al 16 mar 2024	125	124	125	124	128	135	128	128

Figura 7. Estudio porcentual del cambio de altura de las plantas en función del tratamiento



Las plantas con aplicación de fertilizantes exhibieron un crecimiento mayor que las plantas testigo. En la semana 0, la altura de las 16 plantulas fue de 15 cm, seleccionadas estratégicamente para establecer un punto de partida similar, pasadas las dos primeras semanas las alturas encontradas fueron entre 24 y 25 cm para las plantas testigos, de 28 a 27 cm para las plantas con aplicación tradicional, de 29 a 33 cm para la aplicación orgánica y de 30 a 34 cm para el tratamiento con aplicación orgánica aumentada. Este comportamiento,

2	8 al 13 ene 2024	6	5	5	5	6	6	6	6
4	22 al 27 ene 2024	6	6	6	6	8	7	7	7
6	5 al 10 feb 2024	8	7	8	8	10	11	11	11
8	19 al 24 feb 2024	10	11	10	11	12	13	12	12
10	4 al 9 mar 2024	11	12	11	12	14	15	14	14
12	11 al 16 mar 2024	12	12	12	12	15	15	15	15
Semana	Fecha	T3 (Orgánica)				T4 (Orgánica aumentada)			
		B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
0	25 al 30 dic 2023	2	2	2	2	2	2	2	2
2	8 al 13 ene 2024	6	6	6	6	6	7	6	7
4	22 al 27 ene 2024	9	8	8	8	9	9	9	9
6	5 al 10 feb 2024	12	11	11	11	13	13	13	13
8	19 al 24 feb 2024	14	15	14	14	15	16	15	15
10	4 al 9 mar 2024	15	15	16	15	17	16	16	16
12	11 al 16 mar 2024	16	17	16	18	19	17	17	18

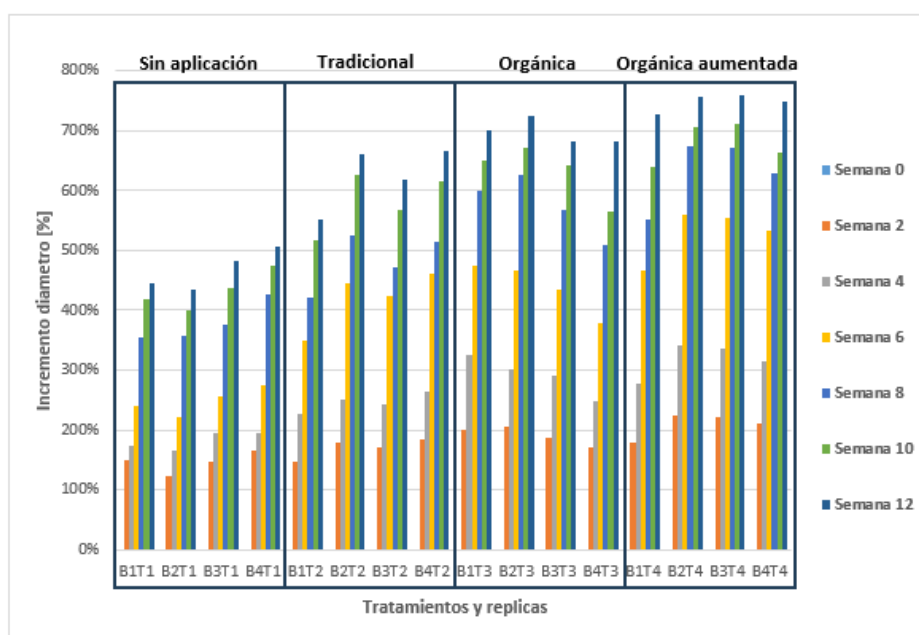
Las 16 plantulas del experimento fueron seleccionadas con tallos de 2 mm. En las primeras dos semanas del experimento, los diámetros de los tallos no presentaron diferencias significativas entre sí, sin embargo, para la sexta semana, los tratamientos que incluyeron la aplicación de fertilizante tradicional y orgánico, evidenciaron diámetros en los tallos con valores superiores a los tratamientos sin ningún tipo de aplicación logrando obtener diámetros entre 16 y 19 mm para los tratamientos con fertilización orgánica, de 15 cm para la tradicional y 12 cm para los tratamientos sin ningún tipo de aplicación.

Similar al comportamiento de la altura de los tallos, los diámetros permiten comparar el beneficio en el rendimiento del cultivo de una mayor absorción de nutrientes esenciales como fósforo, calcio y magnesio que permiten una mayor robustez de las plantas logrando un canal para el adecuado transporte de nutrientes que participaran en el desarrollo de flores y frutos, perimiendo mejores cosechas.

La aplicación del fertilizante orgánico reflejó un incremento de hasta 8 a 9 veces el diámetro del tallo registrado en la semana 0, mejorando en función del aumento de la dosis del

fertilizante. Si se comparan estos incrementos, con el tratamiento sin aplicación y fertilización tradicional, donde los tallos aumentaron su diámetro entre 6 y 7 veces el tamaño inicial, la fertilización orgánica logró tallos entre 3 mm y 4 mm mayores, mejorando así la calidad de la plántula y permitiendo mayor transporte de nutrientes, soporte estructural, distribución de hormonas, entre otros beneficios.

Figura 8. Estudio porcentual del aumento del diámetro de los tallos en función del tratamiento.



6.5 Cantidad de flores en plantas de tomate en función del tratamiento.

La observación detallada de la floración en las plantas comenzó en la quinta semana desde su trasplante, marcando el inicio del monitoreo de la cantidad de flores por planta. Se llevó a cabo un conteo semanal de las flores por cada racimo floral en cada planta, con los datos registrados y presentados en la Tabla 15, se construyó la Figura 9 para visualizar comparativamente la floración en cada tratamiento a lo largo del tiempo.

En la quinta semana, se observó una única flor en una de las plantas del grupo sin tratamiento, en contraste con las plantas donde se realizaron los tratamientos para las cuales todas las plantas ya exhibían floración, con un promedio de 5 flores por planta. Tres semanas después, la cantidad de flores había aumentado de manera significativa en cada tratamiento, especialmente en las plantas tratadas con métodos orgánicos, que mostraban un promedio más alto de flores por planta. Para la octava semana, el promedio de flores fue de 5 por planta en el grupo sin tratamiento, 19 en el grupo con tratamiento tradicional, 23 en el grupo con fertilizante orgánico, y 30 en el grupo con fertilizante orgánico aumentado.

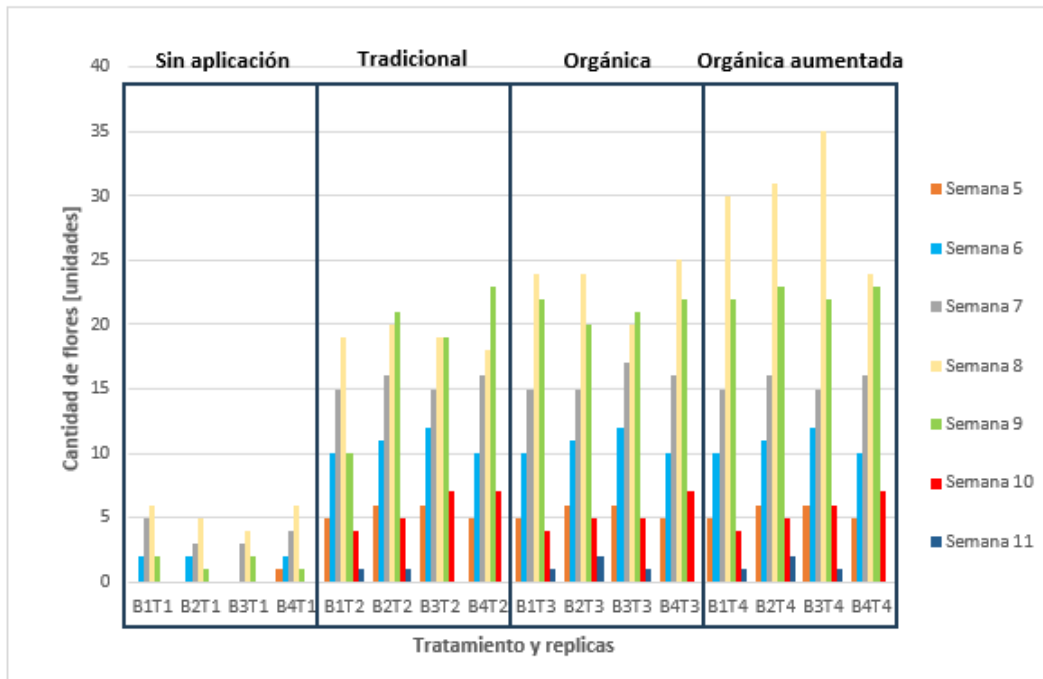
Cabe resaltar, que las flores se convierten en frutos, algunas logran este paso y otras empiezan a caerse de la planta, es por esto, que posterior la décima semana, se evidencia una disminución de flores hasta quedar algunas plántulas sin flores para la onceava semana de mediciones. Los nutrientes que promueven la formación de flores son el boro, el magnesio, el calcio, el fosforo y el potasio, siendo enriquecidos en el fertilizante orgánico, lo que a su vez pudo conducir a una mejor polinización y posteriormente mayor producción de frutos.

Tabla 13. Registro de conteo de flores por planta para cada tratamiento durante las 11 semanas de medición de esta característica.

Semana	Fecha	T1 (Sin aplicación)				T2 (Tradicional)			
		B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
Semana 5	29 ene al 3 feb 2024	0	0	0	1	5	6	6	5
Semana 6	5 al 10 feb 2024	2	2	0	2	10	11	12	10
Semana 7	12 al 17 2024	5	3	3	4	15	16	15	16
Semana 8	19 al 24 feb 2024	6	5	4	6	19	20	19	18
Semana 9	26 feb al 2 mar 2024	2	1	2	1	10	21	19	23
Semana 10	4 al 9 mar 2024	0	0	0	0	4	5	7	7
Semana 11	11 al 16 mar 2024	0	0	0	0	1	1	0	0
Semana	Fecha	T3 (Orgánica)				T4 (Orgánica aumentada)			
		B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
Semana 5	29 ene al 3 feb 2024	5	6	6	5	5	6	6	5
Semana 6	5 al 10 feb 2024	10	11	12	10	10	11	12	10

Semana 7	12 al 17 2024	15	15	17	16	15	16	15	16
Semana 8	19 al 24 feb 2024	24	24	20	25	30	31	35	24
Semana 9	26 feb al 2 mar 2024	22	20	21	22	22	23	22	23
Semana 10	4 al 9 mar 2024	4	5	5	7	4	5	6	7
Semana 11	11 al 16 mar 2024	1	2	1	0	1	2	1	0

Figura 9. Visualización gráfica de la cantidad de flores por planta en cada tratamiento para las semanas de medición



6.6 Cantidad de frutos en función del tratamiento

La aparición de frutos en las plantas se observó a partir de la octava semana del ciclo, momento en el cual se inició el conteo semanal. Este conteo se llevó a cabo cada semana y los resultados fueron detallados en la Tabla 16. Además, se diseñó la Figura 10 para proporcionar una comparación visual de la cantidad de frutos producidos por cada tratamiento aplicado.

En la octava semana, se constató que las plantas del tratamiento de solo riego no produjeron frutos para ese momento, contrastando con las plantas del tratamiento con fertilización tradicional, que ya exhibían un promedio de 2 tomates por planta. Por otro lado, los tratamientos con fertilización orgánica mostraron un rendimiento inicial de 5 tomates por planta. Esta tendencia se mantuvo, con un aumento progresivo en la cantidad de frutos en función del tipo de fertilización aplicada. En la semana 12, el número promedio de frutos fue de 7 tomates para el tratamiento con solo riego, 19 tomates para el tratamiento tradicional, 22 y 25 tomates para los tratamientos orgánico y orgánico aumentado, respectivamente.

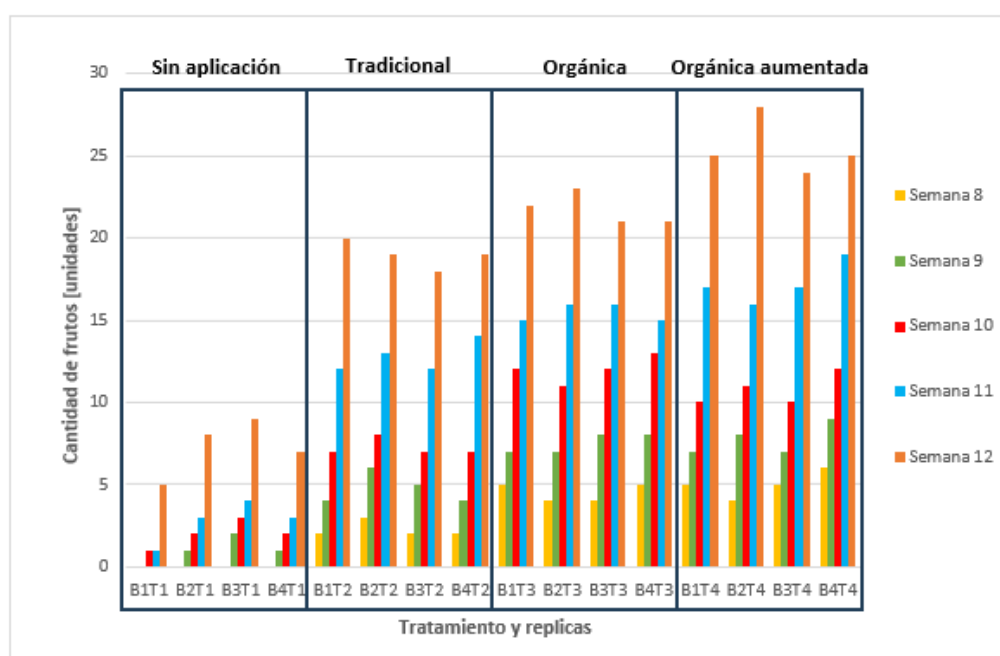
Tabla 14. Registro de conteo semanal de tomates en función del tratamiento.

Semana	Fecha	T1 (Sin aplicación)				T2 (Tradicional)			
		B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
Semana 8	19 al 24 feb 2024	0	0	0	0	2	3	2	2
Semana 9	26 feb al 2 mar 2024	0	1	2	1	4	6	5	4
Semana 10	4 al 9 mar 2024	1	2	3	2	7	8	7	7
Semana 11	11 al 16 mar 2024	1	3	4	3	12	13	12	14
Semana 12	18 al 22 mar 2024	5	8	9	7	20	19	18	19
Semana	Fecha	T3 (Orgánica)				T4 (Orgánica aumentada)			
		B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
Semana 8	19 al 24 feb 2024	5	4	4	5	5	4	5	6
Semana 9	26 feb al 2 mar 2024	7	7	8	8	7	8	7	9
Semana 10	4 al 9 mar 2024	12	11	12	13	10	11	10	12
Semana 11	11 al 16 mar 2024	15	16	16	15	17	16	17	19
Semana 12	18 al 22 mar 2024	22	23	21	21	25	28	24	25

Cabe destacar que una planta en particular del bloque 2 alcanzó un récord de 28 tomates, demostrando el potencial de los tratamientos orgánicos mejorados. Este comportamiento, se explica por el contenido de potasio en el enriquecimiento del abono orgánico, este nutriente,

presenta beneficios importantes en las etapas de producciones de los cultivos siendo este experimento, una prueba de la importancia de emplearlo en las fertilizaciones. Adicionalmente, la presencia de tallos de mayor altura y grosor, así como mayor cantidad de flores comparado con los demás tratamientos, permiten condiciones para una mayor captación de nutrientes traducidos en mejores producciones y calidad de los frutos obtenidos.

Figura 10. Cantidad de frutos de tomate por planta para cada tratamiento y en función de las semanas



6.7 Peso de frutos en función del tratamiento.

La mayoría de los resultados del pesaje de frutos se detallan en la Tabla 17, correspondientes a la semana doce del ciclo de cultivo. En el tratamiento uno, que solo incluyó riego, se obtuvieron un promedio de 7 tomates por planta, con un peso medio de 59.9 gramos por tomate. En contraste, el tratamiento dos, que involucró la aplicación de fertilizante tradicional, produjo un promedio de 19 tomates por planta, cada uno pesando en promedio 147.0 gramos. El tratamiento tres, con aplicación de fertilizante orgánico enriquecido, resultó

en un promedio de 22 tomates por planta y un peso medio de 193.7 gramos. El tratamiento cuatro, que aplicó una mayor cantidad de fertilizante orgánico enriquecido, aumentó el rendimiento a 25 tomates por planta con un peso medio de 245.8 gramos cada uno.

Tabla 15. Registro de pesos de tomates extraídos en gramos (Para los tratamientos 2, 3 y 4, con base a la cantidad de tomates encontrados, se presentan en la tabla un promedio de 10 datos por planta)

Semana	Fecha	T1 (Sin aplicación)				T2 (Tradicional)			
		B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
Semana 12	18 al 22 mar	59	58	57	59	170	149	142	188
		62	59	50	57	141	76	155	155
		54	69	54	55	75	135	125	175
		55	68	58	62	105	141	178	121
		53	67	63	67	186	84	186	183
			58	63	60	187	171	174	96
			56	69	70	91	135	190	105
			52	61		174	165	91	177
				60		96	188	106	184
						181	161	220	121
Semana	Fecha	T3 (Orgánica)				T4 (Orgánica aumentada)			
		B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
Semana 12	18 al 22 mar	205	209	241	210	248	251	196	252
		206	202	210	221	245	250	240	273
		211	195	204	223	191	246	235	248
		202	182	102	160	245	250	235	273
		175	205	161	189	265	260	235	246
		193	95	150	196	235	205	235	260
		225	235	240	191	245	270	244	271
		160	209	199	192	224	251	235	271
		150	190	208	199	245	265	251	221
		190	221	202	190	255	251	235	273

El comportamiento del peso de los frutos en función del tratamiento, tiene relación con el aporte de nutrientes desde los fertilizantes, es por esto que para el caso del tratamiento uno

que sólo recibió agua y ninguna aplicación de nutrientes, los frutos son pocos y de bajo peso, en cambio en la fertilización tradicional, que tuvo presencia de nitrógeno, fosforo y potasio, se logran obtener más frutos con mejor peso, a su vez, para el caso del abono orgánico enriquecido, considerando que adicional al fosforo y potasio, se tiene presencia de calcio, boro, magnesio y materia orgánica, y que estos elementos cumplen un papel fundamental en la transferencia de nutrientes disponibles en el suelo, desarrollo de tallos y a su vez frutos grandes y saludables.

Con la aplicación del abono orgánico enriquecido en los tratamientos 3 y 4, se lograron obtener tomates de hasta 3 y 4 veces más peso si se compara con los tomates sin aplicación (tratamiento 1), esto tiene relación con la presencia de materia orgánica que contribuye a una mayor disponibilidad y transferencia de los nutrientes al sistema radicular, tallo, hojas, tejidos de las plantas y frutos.

6.8 Peso de fruto en función de la aplicación de fertilizante

Para evaluar la eficacia del fertilizante en términos del rendimiento de los frutos de tomate, se estableció un indicador el cual relaciona la cantidad en gramos de fruto obtenido por gramo de fertilizante aplicado, de esta forma, se calculó la cantidad en gramos de tomate producidos por planta y se relacionó con la cantidad de fertilizante utilizado durante el tratamiento. Los resultados de estos cálculos están presentados en la Tabla 18. El tratamiento 1, el cual no tuvo aplicación alguna, no genera datos de análisis para este indicador. Para el tratamiento 2, con la fertilización tradicional, se obtuvieron 12 gramos de tomate por cada gramo de fertilizante aplicado. A su vez, los tratamientos con fertilizante orgánico, 3 y 4, alcanzaron rendimientos de 19 y 23 gramos de tomate por gramo de fertilizante, respectivamente, demostrando así una mayor eficacia en los tratamientos orgánicos sobre el tradicional.

Los resultados obtenidos en los tratamientos 3 y 4, exponen la importancia y los beneficios de la combinación de nutrientes orgánicos y fuentes minerales para la nutrición de cultivos.

En este tipo de aplicaciones, el uso de abonos orgánicos permite tener liberaciones graduales de los nutrientes proporcionando un suministro constante y equilibrado a las plantas, adicionalmente, los abonos orgánicos permiten una mayor retención de agua favoreciendo la disponibilidad de nutrientes.

Tabla 16. Índice del rendimiento del tomate en gramos en función de la cantidad de fertilizante aplicado en cada tratamiento.

Propiedad	T1 (Sin aplicación)				T2 (Tradicional)			
	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
Peso promedio tomates (gramos)	57	61	60	62	140	141	157	150
Cantidad tomates por planta	5	8	9	7	20	19	18	19
Peso total tomates por planta (gramos)	284	488	536	431	2.807	2.670	2.818	2.858
Cantidad fertilizante aplicado (gramos)	-	-	-	-	450	450	450	450
Peso fruto / aplicación fertilizante	-	-	-	-	6	6	6	6
Propiedad	T3 (Orgánica)				T4 (Orgánica aumentada)			
	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
Peso promedio tomates (gramos)	192	194	192	197	240	250	234	259
Cantidad tomates por planta	22	23	21	21	25	28	24	25
Peso total tomates por planta (gramos)	4.220	4.471	4.023	4.138	5.997	7.000	5.608	6.474
Cantidad fertilizante aplicado (gramos)	450	450	450	450	540	540	540	540
Peso fruto / aplicación fertilizante	9	10	9	9	11	13	10	12

El fertilizante diseñado, permitió la presencia de nutrientes como potasio, fosforo, calcio, magnesio y boro, en las inmediaciones de las raíces de las plantulas, los cuales, al ingresar, contribuyeron a frutos en mayor cantidad y peso, favoreciendo el rendimiento del cultivo en términos del fertilizante, A su vez, la presencia de materia orgánica contribuyó a una mayor transferencia de nutrientes generando a si un mayor aprovechamiento de estos. La materia orgánica presente en el fertilizante estimula la vida del suelo, lo cual permite una mayor transferencia de los nutrientes disponibles en el suelo al sistema radicular de las plantas, ingresando así por tallo, tejidos y hojas, hasta los frutos.

7. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS

Este proyecto de investigación permitió desarrollar un fertilizante granular empleando como base un abono orgánico obtenido de subproductos del procesamiento de la caña de azúcar, de acuerdo con las necesidades agronómicas de las hortalizas y el análisis fisicoquímicos del abono, se definieron el boro, calcio, magnesio y azufre principalmente, a su vez, potasio y fósforo como nutrientes a enriquecer. Las materias primas seleccionadas para este enriquecimiento cumplieron el criterio de ser obtenidas en proceso físico, reduciendo la posibilidad de exponer el fertilizante a la presencia de metales pesados que termine incorporándose a los cultivos de hortalizas y consecuentemente a la cadena alimentarios de animales y personas.

El fertilizante diseñado, se presenta como una opción ideal para suplir este tipo de nutrientes en cultivos de hortalizas, sin embargo, para futuras investigaciones se debe enriquecer complementariamente elementos como el nitrógeno y zinc, fundamentales también en el ciclo reproductivo de las hortalizas. Para el alcance de este trabajo y buscando fuentes de materias primas obtenidas de procesos físicos, carácter orgánico y dada la limitada disponibilidad de fuente de nitrógeno y zinc con estas características, no fueron incorporados estos nutrientes en el diseño del fertilizante.

Las alturas y diámetros de los tallos de las plantas tratadas con fertilización orgánica en el experimento realizado fueron superiores a las encontradas en los tratamientos con fertilización tradicional o sin ningún tipo de aplicación. Este comportamiento se puede atribuir a mayores tasas de absorción de nutrientes como el fósforo, calcio y magnesio, presentes en el enriquecimiento del abono orgánico. Similarmente ocurrió con la cantidad de flores y frutos presenciados, encontrando una mayor cantidad en los tratamientos con fertilización orgánica atribuido a una mayor absorción de nutrientes como fósforo, boro y potasio. Las alturas de los tratamientos orgánicos fueron hasta 37% mayor que los tratamientos sin aplicación y 3.2% comparados con los tratamientos de fertilización tradicional. Para el caso de los diámetros, los tratamientos orgánicos lograron hasta un 50%

más de tamaño comparado al tratamiento sin aplicación y un 12% cuando se compara con la fertilización tradicional. En cuanto a los frutos, los rendimientos con fertilización orgánica fueron superiores tanto en cantidad como en peso, encontrando hasta un 40% de productividad comparado con el tratamiento sin ningún tipo de aplicación y un 15% con fertilización tradicional.

El formato granular del fertilizante orgánico ofrece múltiples ventajas prácticas, incluyendo mejor manejo, almacenamiento y aplicación. Propiedades físicas como dureza de 2 kgf/in², humedad del 3% y tamaño de partícula en un rango de 2.0 – 4.0 mm, son solicitadas en aplicaciones industriales para permitir mezclas y manipuleos con equipos de agroindustria, de acuerdo con las determinaciones realizadas, el fertilizante diseñado cumple con estas propiedades físicas. Esta forma física del abono orgánico permitirá fijar las bases para el desarrollo a gran escala de fertilizantes orgánicos granulares con aporte de nutrientes, solicitado en la agroindustria para lograr incorporar en las mezclas físicas de fertilizantes, fuentes naturales de menor impacto ambiental en los cultivos.

El empleo de Yeso Agrícola, Roca Fosfórica, Leonardita, Ulexita y Silicato de Magnesio, la mayoría de ellos recursos disponibles localmente en Colombia, contribuye a la sostenibilidad ambiental y económica de la agricultura. La utilización de estas materias primas contribuye a mantener y mejorar la fertilidad del suelo, reduciendo los efectos adversos asociados con el uso de fertilizantes químicos, como la salinización y la contaminación de aguas subterráneas. Este enfoque no solo disminuye la dependencia de insumos agrícolas extranjeros, sino que también puede contribuir a la seguridad alimentaria y la soberanía agrícola de Colombia, reduciendo los costos de producción y mitigando la volatilidad de los precios internacionales de los fertilizantes.

La evaluación del fertilizante en hortalizas subraya la importancia de diversificar los cultivos en Colombia, donde la producción está altamente concentrada en café, banano y caña de azúcar, especialmente en el Valle del Cauca, siendo este último cultivo el de mayor relevancia

a nivel producción e investigación. Promover el uso de fertilizantes orgánicos y minerales en otros cultivos puede impulsar la diversificación agrícola, mejorando la resiliencia del sector agrícola y ofreciendo mayores oportunidades económicas a los agricultores.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Xueping Wang, Yongyan Yang, Shuangling Zhong, Qingye Meng, Yiwei Li, Jia Wang, Yan Gao, Xuejun Cui, Advances in controlled-release fertilizer encapsulated by organic-inorganic composite membranes, *Particuology*, Volume 84, 2024, Pages 236-248, ISSN 1674-2001, <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.06.019>.

[2] Selvakumar, G., Yi, P.H., Lee, S.E. et al. Hairy vetch, compost and chemical fertilizer management effects on red pepper yield, quality, and soil microbial population. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 59, 607–614 (2018). <https://doi.org/10.1007/s13580-018-0078-z>.

[3] Priya E., Sudipta Sarkar, Pradip K. Maji, A review on slow-release fertilizer: Nutrient release mechanism and agricultural sustainability, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 12, Issue 4, 2024, 113211, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113211>.

[4] Arjun Adhikari, Eun-Hae Kwon, Muhammad Aaqil Khan, Shifa Shaffique, Sang-Mo Kang, In-Jung Lee, Enhanced use of chemical fertilizers and mitigation of heavy metal toxicity using biochar and the soil fungus *Bipolaris maydis* AF7 in rice: Genomic and metabolomic perspectives, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 271, 2024, 115938, ISSN 0147-6513, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.115938>.

[5] E. Agbor, E. Besong, P. Ebai, D.I. Inyang, L.E. Okon, S. Ugar, T.N. Nganje, Baseline assessment of the health risk of potentially toxic heavy metals in commonly consumed vegetables in parts of Mamfe, Southwest Region, Cameroon, *Journal of Trace Elements and Minerals*, Volume 8, 2024, 100115, ISSN 2773-0506, <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2023.100115>.

[6] Sabiha-Javied, N. Siddque, S. Waheed, Q. uz Zaman, A. Aslam, M. Tufail, R. Nasir, Uptake of heavy metal in wheat from application of different phosphorus fertilizers, *Journal of Food Composition and Analysis*, Volume 115, 2023, 104958, ISSN 0889-1575, <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104958>.

[7] Amit Kumar, Vinod Kumar, Andrés Rodríguez-Seijo, Raj Setia, Sumit Singh, Ashok Kumar, Chandra Shekhar Seth, Renato Somma, Appraisal of heavy metal(loid)s contamination in rice grain and associated health risks, *Journal of Food Composition and Analysis*, Volume 131, 2024, 106215, ISSN 0889-1575, <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106215>.

[8] Michael Hemkemeyer, Sanja A. Schwalb, Stefanie Heinze, Rainer Georg Joergensen, Florian Wichern, Functions of elements in soil microorganisms, *Microbiological Research*, Volume 252, 2021, 126832, ISSN 0944-5013, <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126832>.

[9] Yilu Xu, Balaji Seshadri, Binoy Sarkar, Hailong Wang, Cornelia Rumpel, Donald Sparks, Mark Farrell, Tony Hall, Xiaodong Yang, Nanthi Bolan, Biochar modulates heavy metal toxicity and improves microbial carbon use efficiency in soil, *Science of The Total Environment*, Volume 621, 2018, Pages 148-159, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.214>.

[10] Rashid, M., Hussain, Q., Khan, K.S. et al. Carbon-Based Slow-Release Fertilizers for Efficient Nutrient Management: Synthesis, Applications, and Future Research Needs. *J Soil Sci Plant Nutr* 21, 1144–1169 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00429-9>

[11] Yinlin Fan, Qingyu Feng, Yong Huang, Nengliang Yang, Huihui Fan, Boyong Li, Xinyan Wang, Lei Yang, Haw Yen, Feng Wu, Liding Chen, Determining optimal range of reduction

rates for nitrogen fertilization based on responses of vegetable yield and nitrogen losses to reduced nitrogen fertilizer application, *Science of The Total Environment*, Volume 924, 2024, 171523, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171523>.

[12] Biao Ma, Mohammad Sharif Karimi, Kamel Si Mohammed, Irum Shahzadi, Jiapeng Dai, Nexus between climate change, agricultural output, fertilizer use, agriculture soil emissions: Novel implications in the context of environmental management, *Journal of Cleaner Production*, Volume 450, 2024, 141801, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141801>.

[13] Lin Ma, Daotong Wang, Lei Zhang, Yue Ge, Yueqiu Liu, Yunxia Cheng, Xingfu Jiang, Green manure application improves insect resistance of subsequent crops through the optimization of soil nutrients and rhizosphere microbiota, *iScience*, Volume 27, Issue 7, 2024, 110320, ISSN 2589-0042, <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.110320>.

[14] Xinyi Yang, Pengpeng Duan, Guitong Li, Xiaorong Zhao, Qimei Lin, Kun Zhu, Spatial-heterogeneous granulation of organic amendments and chemical fertilizer stimulated N₂O emissions from agricultural soil: An microcosm study, *Journal of Environmental Management*, Volume 277, 2021, 111437, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111437>.

[15] Riikka Keskinen, Terhi Suojala-Ahlfors, Minna Sarvi, Marleena Hagner, Janne Kaseva, Tapio Salo, Risto Uusitalo, Kimmo Rasa, Granulated broiler manure based organic fertilizers as sources of plant available nitrogen, *Environmental Technology & Innovation*, Volume 18, 2020, 100734, ISSN 2352-1864, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100734>

[16] Bernardo Melo Montes Nogueira Borges, Dalton Belchior Abdala, Micael Felipe de Souza, Larissa Marques Viglio, Marta Jordana Arruda Coelho, Paulo Sergio Pavinato, Henrique Coutinho Junqueira Franco, Organomineral phosphate fertilizer from sugarcane byproduct and its effects on soil phosphorus availability and sugarcane yield, *Geoderma*, Volume 339, 2019, Pages 20-30, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.036>.

[17] Xintong Xu, Chao Xiao, Ruiyu Bi, Ying Jiao, Bingxue Wang, Yubing Dong, Zhengqin Xiong, Optimizing organic fertilization towards sustainable vegetable production evaluated by long-term field measurement and multi-level fuzzy comprehensive model, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 368, 2024, 109008, ISSN 0167-8809, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109008>.

[18] Dana Cordell, Jan-Olof Drangert, Stuart White, The story of phosphorus: Global food security and food for thought, *Global Environmental Change*, Volume 19, Issue 2, 2009, Pages 292-305, ISSN 0959-3780, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>.

[19] Ditta, Allah and Arshad, Muhammad. "Applications and perspectives of using nanomaterials for sustainable plant nutrition" *Nanotechnology Reviews*, vol. 5, no. 2, 2016, pp. 209-229. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2015-0060>.

[20] Xu, M., He, R., Cui, G. et al. Understanding Soil Contamination in Nitrogen Fertilizer Manufacturing: Spatial Distribution, Factors, and Implications for Environmental Management. *Water Air Soil Pollut* 235, 236 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07024-5>

[21] Sukhdeep Singh, Ravinder Singh, Kulpreet Singh, Karun Katoch, Ahmed A. Zaeen, Dereje A. Birhan, Atinderpal Singh, Hardev S. Sandhu, Hardeep Singh, Lakesh K. Sahrma, Smart fertilizer technologies: An environmental impact assessment for sustainable agriculture, *Smart Agricultural Technology*, Volume 8, 2024, 100504, ISSN 2772-3755, <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100504>.

[22] Avşar, C., Sustainable transition in the fertilizer industry: alternative routes to low-carbon fertilizer production, *International Journal of Environmental Science and Technology*, Volume 21, 2024, ISSN 17351472, pages 7837 – 7848, DOI: 10.1007/s13762-024-05607-7.

[23] Maduabuchi P. Iboko, Elliott R. Dossou-Yovo, Sunday E. Obalum, Chidozie J. Oraegbunam, Siméon Diedhiou, Christian Brümmer, Niaba Témé, Paddy rice yield and greenhouse gas emissions: Any trade-off due to co-application of biochar and nitrogen fertilizer? A systematic review, *Heliyon*, Volume 9, Issue 11, 2023, e22132, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22132>.

[24] Fabio Sporchia, Dario Caro, Exploring the potential of circular solutions to replace inorganic fertilizers in the European Union, *Science of The Total Environment*, Volume 892, 2023, 164636, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164636>.

[25] Sukhdeep Singh, Ravinder Singh, Kulpreet Singh, Karun Katoch, Ahmed A. Zaeen, Dereje A. Birhan, Atinderpal Singh, Hardev S. Sandhu, Hardeep Singh, Lakesh K. Sahrma, Smart fertilizer technologies: An environmental impact assessment for sustainable agriculture, *Smart Agricultural Technology*, Volume 8, 2024, 100504, ISSN 2772-3755, <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100504>.

[26] Ling Qian, Chungmei, Tong Li, Weichen Luo, Weiwei Liu, Mingming Chen, Xiaojuan Yang, Xiaoyu Li, Beiji Cheng, Huan Ma, A versatile biochar fertilizer used for adsorption of heavy metals and enhancement of plant growth in metal contaminated soil, *Environmental Technology & Innovation*, Volume 36, 2024, 103743, ISSN 2352-1864, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103743>.

[27] Yang Zhang, Changbin Yin, Suzhen Cao, Leilei Cheng, Guosheng Wu, Jianbiao Guo, Heavy metal accumulation and health risk assessment in soil-wheat system under different nitrogen levels, *Science of The Total Environment*, Volumes 622–623, 2018, Pages 1499-1508, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.317>.

[28] Christian O. Asadu, Chinonso Anthony Ezema, Benjamin Nnamdi Ekwueme, Chijioke Elijah Onu, Ikechukwu Maxwell Onoh, Thomas Adejoh, Timothy Prince Chidike Ezeorba, Churchill Chisom Ogbonna, Patricia Ihuaku Otuh, Japheth O. Okoye, Umeagukwu O. Emmanuel, Enhanced efficiency fertilizers: overview of production methods, materials used, nutrients release mechanisms, benefits and considerations, *Environmental Pollution and Management*, 2024, ISSN 2950-3051, <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.07.002>.

[29] M. Aoun, A.G. El Samrani, B.S. Lartiges, V. Kazpard, Z. Saad, Releases of phosphate fertilizer industry in the surrounding environment: Investigation on heavy metals and polonium-210 in soil, *Journal of Environmental Sciences*, Volume 22, Issue 9, 2010, Pages 1387-1397, ISSN 1001-0742, [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60247-3](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60247-3).

[30] Feng Zhang, Yunhe Xie, Rui Peng, Xionghui Ji, Lianyang Bai, Heavy metals and nutrients mediate the distribution of soil microbial community in a typical contaminated farmland of South China, *Science of The Total Environment*, Volume 947, 2024, 174322, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174322>.

[31] Zafar Iqbal Khan, Kafeel Ahmad, Sumaira Yasmeen, Nudrat Aisha Akram, Muhammad Ashraf, Naunain Mehmood, Potential health risk assessment of potato (*Solanum tuberosum* L.) grown on metal contaminated soils in the central zone of Punjab, Pakistan, *Chemosphere*, Volume 166, 2017, Pages 157-162, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.064>.

[32] Liu, Z., Nan, Z., Zhao, C. et al. Potato absorption and phytoavailability of Cd, Ni, Cu, Zn and Pb in sierozem soils amended with municipal sludge compost. *J. Arid Land* 10, 638–652 (2018). <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0062-6>.

[33] Arjun Adhikari, Eun-Hae Kwon, Muhammad Aaqil Khan, Shifa Shaffique, Sang-Mo Kang, In-Jung Lee, Enhanced use of chemical fertilizers and mitigation of heavy metal toxicity using biochar and the soil fungus *Bipolaris maydis* AF7 in rice: Genomic and metabolomic perspectives, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 271, 2024, 115938, ISSN 0147-6513, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.115938>.

[34] Priya E., Sudipta Sarkar, Pradip K. Maji, A review on slow-release fertilizer: Nutrient release mechanism and agricultural sustainability, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 12, Issue 4, 2024, 113211, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113211>.

[35] Camila Gruber Chiaregato, Débora França, Lucas Luiz Messa, Tamires dos Santos Pereira, Roselena Faez, A review of advances over 20 years on polysaccharide-based polymers applied as enhanced efficiency fertilizers, *Carbohydrate Polymers*, Volume 279, 2022, 119014, ISSN 0144-8617, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.119014>.

[36] Xiang Y, Ru X, Shi J, Song J, Zhao H, Liu Y, et al. Preparation and properties of a novel semi-IPN slow-release fertilizer with the function of water retention. *J Agric Food Chem* 2017;65(50):10851–8. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b03827>.

[37] Lubkowski K, Smorowska A, Grzmil B, Kozłowska A. Controlled-release fertilizer prepared using a biodegradable aliphatic copolyester of poly(butylene succinate) and dimerized fatty acid. *J Agric Food Chem* 2015;63(10):2597–605. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b00518>.

[38] Ihsane Kassem, El-Houssaine Ablouh, Fatima-Zahra El Bouchtaoui, Mohamed Jaouahar, Mounir El Achaby, Polymer coated slow/ controlled release granular fertilizers: Fundamentals and research trends, *Progress in Materials Science*, Volume 144, 2024, 101269, ISSN 0079-6425, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101269>.

[39] Mingkui Zhang, Huimin Zhang, Co-transport of dissolved organic matter and heavy metals in soils induced by excessive phosphorus applications, *Journal of Environmental Sciences*, Volume 22, Issue 4, 2010, Pages 598-606, ISSN 1001-0742, [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60151-0](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60151-0).

[40] Oluwadunsin Oyetunji, Nanthi Bolan, Greg Hancock, A comprehensive review on enhancing nutrient use efficiency and productivity of broadacre (arable) crops with the combined utilization of compost and fertilizers, *Journal of Environmental Management*, Volume 317, 2022, 115395, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115395>.

[41] Junliang Xin, Enhancing soil health to minimize cadmium accumulation in agro-products: the role of microorganisms, organic matter, and nutrients, *Environmental Pollution*,

Volume 348, 2024, 123890, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123890>.

[42] qbal, S., Thierfelder, C., Khan, H.Z. et al. Maximizing maize quality, productivity and profitability through a combined use of compost and nitrogen fertilizer in a semi-arid environment in Pakistan. *Nutr Cycl Agroecosyst* 107, 197–213 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9829-y>

[43] Mateusz Samoraj, Małgorzata Mironiuk, Anna Witek-Krowiak, Grzegorz Izydorczyk, Dawid Skrzypczak, Katarzyna Mikula, Sylwia Baśladyńska, Konstantinos Moustakas, Katarzyna Chojnacka, Biochar in environmental friendly fertilizers - Prospects of development products and technologies, *Chemosphere*, Volume 296, 2022, 133975, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133975>.

[44] Sayed Ameenuddin Irfan, Radzuan Razali, KuZilati KuShaari, Nurlidia Mansor, Babar Azeem, Ashlee N. Ford Versypt, A review of mathematical modeling and simulation of controlled-release fertilizers, *Journal of Controlled Release*, Volume 271, 2018, Pages 45-54, ISSN 0168-3659, <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.12.017>.

[45] Xinyi Yang, Pengpeng Duan, Guitong Li, Xiaorong Zhao, Qimei Lin, Kun Zhu, Spatial-heterogeneous granulation of organic amendments and chemical fertilizer stimulated N₂O emissions from agricultural soil: An microcosm study, *Journal of Environmental Management*, Volume 277, 2021, 111437, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111437>.

[46] Riikka Keskinen, Terhi Suojala-Ahlfors, Minna Sarvi, Marleena Hagner, Janne Kaseva, Tapio Salo, Risto Uusitalo, Kimmo Rasa, Granulated broiler manure based organic fertilizers as sources of plant available nitrogen, *Environmental Technology & Innovation*, Volume 18, 2020, 100734, ISSN 2352-1864, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100734>.

[47] Katja Schaldach, Volker Herdegen, Andreas Siegfried Braeuer, Do Nang Vinh, Nguyen Van Toan, Le Van Tam, Sustainable value added material use of occurring by-products from sugar and rice production in Vietnam, Science of The Total Environment, Volume 835, 2022, 155414, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155414>.

[48] Ramirez, C. A. M. (s/f). Sector Agroindustrial de la Caña. Asocaña - Sector Agroindustrial de la Caña. Recuperado el 28 de julio de 2024, de <https://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215>

[49] Subproductos y Derivados de la Caña. (s/f). Procana.org. Recuperado el 28 de julio de 2024, de <https://procana.org/site/subproductos-y-derivados-de-la-cana/>

[50] Bohórquez, A., Puentes, Y. J., & Menjivar, J. C. (2014). Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar. Corpoica ciencia y tecnología agropecuaria, 15(1), 73–81.

[51] Juárez-Maldonado, A., De-Alba-Romenus, K., Morales-Diaz, A., Benavides-Mendoza A., “Macro-Nutrient Uptake Dynamics in Greenhouse Tomato Crop” . Journal of Plant Nutrition, 31 de julio del 2017 doi: <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1270310>.

[52] Quesada-Roldán, G., & Bertsch-Hernández, F., (2013). Obtención de la curva de extracción nutrimental del híbrido de tomate FB-17. Terra Latinoamericana, 31(1), 1-7. Recuperado en 19 de diciembre de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018757792013000100001&lng=es&tlng=.

[53] Gomez Sanchez, M. Gestión de la fertilidad del suelo y nutrición de cultivos: criterio para el manejo integral de herramientas de diagnóstico, interpretación, pronóstico y recomendación de enmiendas y fertilizantes. Bogota D.C. (2008).

[54] Quiroz Guerrero, Ismael, & Pérez Vázquez, Arturo. (2013). Vinaza y compost de cachaza: efecto en la calidad del suelo cultivado con caña de azúcar. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(spe5), 1069-1075. Recuperado en 11 de febrero de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200709342013000900019&lng=es&tlng=es.

[55] R. de L. Vasconcelos, H. J. de Almeida, R. de M. Prado, L. F. J. dos Santos, and J. M. Pizauro Júnior, “Filter cake in industrial quality and in the physiological and acid phosphatase activities in cane-plant,” *Ind Crops Prod*, vol. 105, pp. 133–141, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.INDCROP.2017.04.036.

[56] M. L. Dotaniya and S. C. Datta, “Impact of Bagasse and Press Mud on Availability and Fixation Capacity of Phosphorus in an Inceptisol of North India,” *Sugar Tech*, vol. 16, no. 1, pp. 109–112, Mar. 2014, doi: 10.1007/S12355-013-0264-3/FIGURES/3.

[57] C. M. Lopes et al., “Improving the fertilizer value of sugarcane wastes through phosphate rock amendment and phosphate-solubilizing bacteria inoculation,” *J Clean Prod*, vol. 298, p. 126821, May 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.126821.

[58] Parra Zeballos, Roberto, & Morales Visraca, Marcela Ariana. (2013). ESTUDIO BÁSICO PARA LA OBTENCIÓN DE ÁCIDO BÓRICO A PARTIR DE LA ULEXITA Y DIÓXIDO DE CARBONO. *Revista Boliviana de Química*, 30(1), 42-49. Recuperado en 07

de mayo de 2024, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-54602013000100005&lng=es&tlng=es.

[59] Sancho Mora, A., & Gadea Rivas, A. (2018). Incorporación del silicato de magnesio en la fertilización mineral del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en finca La Vega, San Carlos, Costa Rica. *Revista AgroInnovación En El Trópico Húmedo*, 1(1), 25–34. Recuperado a partir de <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/agroinn/article/view/3926>.

[60] Morillo, Armando, Sequera, Omaira, & Ramírez, Ricardo. (2007). Roca fosfórica acidulada como fuente de fósforo en un suelo ácido con o sin encalado. *Bioagro*, 19(3), 161-168. Recuperado en 07 de mayo de 2024, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612007000300006&lng=es&tlng=es.

[61] Damian Suclupe, Manuel Julio, Gonzáles Veintimilla, Federico, Quiñones Paredes, Pedro, & Terán Iparraguirre, Jackson Ricardo. (2018). Plan of amendments, agricultural gypsum, improved and enriched compost with EM and earthworm humus, to improve the soil. *Arnaldoa*, 25(1), 141-158. <https://dx.doi.org/http://doi.org/10.22497/arnaldoa.251.25109>

[62] Gutiérrez, C JL, G González, C, Segura C, MA, I Sánchez, C, Orozco V, JA, & Fortis H, M. (2015). Efecto de ácidos húmicos de Leonardita en la estabilidad de agregados del suelo y raíces de melón en condiciones de invernadero. *Phyton (Buenos Aires)*, 84(2), 298-305. Recuperado en 07 de mayo de 2024, de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-56572015000200006&lng=es&tlng=pt.

[63] Catalizadores de Mo soportado en bentonita, caolín y zeolitas naturales: síntesis, caracterización y evaluación en oxidación desulfurativa / María Angélica, Gallo; Mercedes, Muñoz; María Florencia, Agosto; Carmen Inés, Cabello; Gazzoli, Delia. - ELETTRONICO. - (2014), pp. 1-6. (Intervento presentato al convegno XXIV Congreso Iberoamericano de Catálisis tenuto a Medellín, Colombia nel 15-19 de settembre 2014).