

# Evaluation of Biodegradable Polymeric Matrix Fertilizers as a Strategy for Slow Nutrient Release in Common Bean Cultivation

Camila Andrea Arias Renderos<sup>1</sup>; Victoria Cortés<sup>2</sup>; Vladimir Hernandez<sup>3</sup>

<sup>1,3,2</sup>University Zamorano, Honduras, [camila.arias@est.zamorano.edu](mailto:camila.arias@est.zamorano.edu), [vcortes@zamorano.edu](mailto:vcortes@zamorano.edu),  
[jhernandez@zamorano.edu](mailto:jhernandez@zamorano.edu)

**Abstract** — *In this study, a protocol was developed to produce biodegradable slow-release fertilizers based on cellulose and  $\kappa$ -carrageenan, using urea as the nutrient source. The products were characterized in terms of biodegradability, mechanical strength, and dissolution time in an aqueous medium. Subsequently, their effectiveness was evaluated in a greenhouse experiment using the common bean cultivar Amadeus 77 (*Phaseolus vulgaris*). It is concluded that these formulations have the potential to become a viable alternative for improving urea use efficiency. However, further studies are required before confirming their effectiveness in real production systems.*

**Keywords** — *Slow-release fertilizers, nutrient management, plant nutrition.*

# Evaluación de Fertilizantes de Matriz Polimérica Biodegradable como Estrategia de Liberación Lenta de Nutrientes en el Cultivo de Frijol Común

Camila Andrea Arias Renderos<sup>1</sup>; Victoria Cortés<sup>2</sup>; Vladimir Hernández<sup>3</sup>

<sup>1,3,2</sup>Universidad Zamorano, Honduras, [camila.arias@est.zamorano.edu](mailto:camila.arias@est.zamorano.edu), [vcortes@zamorano.edu](mailto:vcortes@zamorano.edu), [jhernandez@zamorano.edu](mailto:jhernandez@zamorano.edu)

**Resumen** - En el presente estudio se formuló un protocolo para la elaboración de fertilizantes de liberación lenta biodegradables a partir de celulosa y  $\kappa$ -carragenina, utilizando urea como fuente de nutrientes. Los productos se caracterizaron en términos de biodegradabilidad, resistencia mecánica y tiempo de disolución en medio acuoso. Posteriormente, su efectividad fue evaluada en un experimento en condiciones de invernadero, utilizando el cultivo de frijol común Amadeus 77 (*Phaseolus vulgaris*). Se concluye que estas formulaciones tienen el potencial de convertirse en una alternativa viable para mejorar la eficiencia del uso de la urea. Sin embargo, se requieren estudios complementarios antes de afirmar su eficiencia en sistemas productivos reales.

**Palabras clave** - Fertilizantes de liberación lenta, manejo de nutrientes, nutrición vegetal

## I. INTRODUCCIÓN

La agricultura intensiva, caracterizada por un elevado uso de capital e insumos, puede provocar un rápido deterioro del suelo [1]. Una de las principales formas de degradación del suelo es la degradación química, que se manifiesta en el agotamiento de nutrientes esenciales para las plantas, como el nitrógeno [2]. En los sistemas agrícolas convencionales, el nitrógeno es especialmente vulnerable a la pérdida, lo que ha impulsado el uso de fertilizantes químicos como estrategia compensatoria [3]. No obstante, se estima que alrededor del 50% del fertilizante aplicado se pierde por lixiviación en forma de nitratos [4], generando nuevos desafíos económicos y ambientales [5].

En este contexto, los fertilizantes de liberación lenta (FLL) representan una alternativa prometedora para mejorar la eficiencia de aplicación y reducir riesgos ambientales [6]. El modo de acción de los FLL se basa en una tasa de liberación de nutrientes más baja en comparación a los fertilizantes convencionales [7]. Sin embargo, la mayoría de FLL se fabrican a partir de materiales derivados del petróleo, lo que implica altos costos de producción, persistencia en su degradación y mayores impactos ambientales [8]. Como una alternativa sostenible, se plantea el uso de polímeros biodegradables provenientes de recursos renovables [9].

Varios estudios han demostrado el potencial de la carragenina y la celulosa para la creación de biomateriales, por

sus características biocompatibles y no tóxicas [10]. La carragenina es un polisacárido sulfatado, hidrofílico y de alto peso molecular que se obtiene de algas rojas [11]. Debido a sus propiedades gelificantes y su alto nivel de resistencia tiene amplias aplicaciones en el sector de la agroindustria, la farmacología y la medicina. Por otro lado, la celulosa es un biopolímero conformado por glucosa y puede obtenerse de la mayoría de los tejidos vegetales. Por sus características químicas y estructurales posee la capacidad de encapsular sustancias y protegerlas de la degradación [12].

Ante la necesidad de innovar en el sector agrícola para optimizar el uso de recursos, reducir la pérdida de nutrientes y mejorar la precisión en la dosificación, se requiere el desarrollo de soluciones tecnológicas que fortalezcan la eficiencia de los sistemas de fertilización y contribuyan a garantizar la seguridad alimentaria. En este contexto, la presente investigación evalúa la eficiencia de la urea incorporada en matrices poliméricas biodegradables de celulosa y carragenina, como mecanismo de liberación lenta, a lo largo del ciclo fenológico del cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*).

## II. METODOLOGÍA

Este estudio se desarrolló en la Universidad Zamorano, ubicada en el departamento de Francisco Morazán, Honduras. El lugar tiene una temperatura media anual de 24°C, una precipitación anual de 1,100 mm y una elevación de 800 msnm. El protocolo de elaboración de la matriz nutritiva y los análisis de laboratorio se realizaron en el Laboratorio Especializado del Departamento de Ambiente y Desarrollo (LEAD) entre los meses de enero y abril de 2025. La experimentación en campo se realizó en las instalaciones de la Unidad de Investigación de Cultivos (UIDC) del Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria entre febrero y abril de 2025.

### A. Formulación de protocolo

Se realizó una revisión de literatura aplicando filtros por idioma (inglés y español) y período de publicación (últimos 20 años). Basándose en los artículos seleccionados, se determinaron una serie de pasos clave. Los materiales utilizados, cálculos y modificaciones hechas durante los

procesos de prueba se describieron a detalle en un protocolo para asegurar su estandarización.

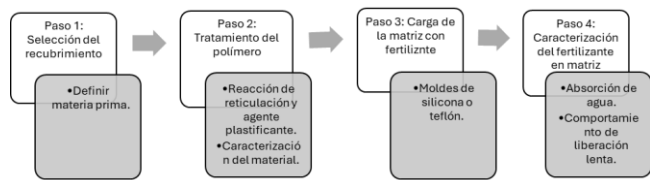


Fig 1. Pasos Clave para la Elaboración de Matrices Poliméricas

Para el presente experimento, se utilizó urea, cuyo único aporte nutricional es el nitrógeno (46-0-0). Esta se integró a través de una técnica in situ, donde todos los materiales se añaden durante la reacción de reticulación polimérica de la matriz, transfiriendo el nutriente directamente al producto [13].

B. Preparación de matrices poliméricas

Para la elaboración de la matriz de carragenina se utilizó como base el procedimiento descrito por Ávila Viatela, 2017 [14]. Utilizando κ-carragenina como materia prima y glicerol como agente ligante. Sin embargo, se identificó la necesidad de modificar el protocolo base, debido a que la incorporación de urea alteraba las características del producto final. Por ello se realizaron pruebas experimentales para optimizar la metodología, enfocadas en tres puntos críticos: la temperatura de la reacción de entrecruzamiento, la velocidad de agitación y el método de gelificación.

Con el objetivo de comprender el comportamiento del material a distintas temperaturas de reticulación, se realizaron pruebas con variaciones de temperatura: a) 70 °C, b) 120 °C y c) 200 °C. De igual manera, se probaron distintas velocidades de agitación para determinar si era posible acelerar el proceso de producción al aumentar la velocidad de mezclado. Las pruebas de agitación se realizaron a tres velocidades distintas: a) 200 rpm, b) 360 rpm y c) 450 rpm. Finalmente, para el proceso de gelificación, se contemplaron tres alternativas: a) temperatura ambiente, b) refrigeración a 2 °C y, c) congelación a -2 °C.

Asimismo, se realizaron pruebas preliminares para determinar la capacidad de asimilación de la matriz. Para ello, se incorporaron distintas cantidades de urea granular (0.5, 1.0 y 1.5 g) en cápsulas de muestra. Estas cápsulas fueron mezcladas y sometidas al proceso de gelificación. La capacidad de asimilación se evaluó con base en criterios de homogeneidad en la distribución del fertilizante y consistencia.

Para la preparación de la matriz de celulosa se empleó la metodología propuesta por Durpekova et al., 2021, y modificada por Armas, 2023 [15]. Utilizando carboximetilcelulosa sódica (CMC), hidroxietilcelulosa (HEC) y ácido láctico como materia prima, además de ácido cítrico como agente ligante. Las cantidades exactas de las materias primas se definieron a partir de un balance de materia.

Se llevaron a cabo ensayos de incorporación del fertilizante mediante la adición de urea en concentraciones de 0.5, 1.0 y 1.5

g por cápsula de prueba. La capacidad de asimilación de la matriz se evaluó a partir de las características morfológicas y físicas de las muestras obtenidas.

La evaluación cualitativa de ambas matrices se basó en los criterios de aceptación descritos en la Tabla 1, pensando en definir características adecuadas para la etapa experimental.

TABLA I  
CRITERIOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS MATRICES POLIMÉRICAS

| Criterio por caracterizar    | Descripción                                                        | Referencia               |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Descripción                  | Nutrientes solubles en agua encapsulados en una matriz polimérica. | Wesołowska et al. (2021) |
| Humedad del producto final   | Baja humedad en el producto final.                                 | Lü et al. (2014)         |
| Tiempo de disolución en agua | Disolución que provocó la liberación del 70% del N en 12 días.     | Cen et al. (2021)        |

D. Comparación del Desempeño Agronómico del Cultivo de Frijol Bajo Aplicación de Urea en Matrices Poliméricas

Las propiedades de liberación lenta de las cápsulas fueron evaluadas en un experimento de campo. El experimento consideró un total de ocho tratamientos, cada uno con nueve repeticiones, para un total de 72 unidades experimentales. Se definió como unidad experimental un macetero conteniendo dos plantas de frijol, las cuales fueron manejadas de manera conjunta durante todo el ensayo.

Para reducir el sesgo y garantizar la independencia en las observaciones, el experimento fue conducido dentro de una casa malla. Esto permitió homogenizar variables ambientales de radiación solar, temperatura y humedad relativa. A su vez, se brindaron iguales condiciones de riego y manejo. Las únicas variables introducidas fueron el momento y tipo de fertilización.

La dosificación del fertilizante de cada tratamiento se definió a partir de las recomendaciones del Laboratorio de Suelos de Zamorano, considerando los requerimientos del cultivo y el aporte de nutrientes del suelo. Con base en ello, se estimó la dosis por planta asumiendo una densidad de 200,000 plantas por hectárea [16].

Los ocho tratamientos desarrollados fueron a) tratamiento sin fertilización, b) urea, c) urea+DAP, d) Basacote 3M, e) urea con carragenina, dosis media, f) urea con carragenina, dosis completa, g) urea con celulosa, dosis media y h) urea con celulosa, dosis completa.

En los tratamientos con matrices poliméricas se evaluaron dos estrategias de fertilización. Siendo la primera una aplicación fraccionada, donde la mitad del nitrógeno se aplicó a la siembra y la otra mitad durante la etapa de floración, estos se denominaron tratamientos con dosis media. La segunda estrategia se basa en una aplicación única, en la que la totalidad del nitrógeno se aplicó al momento de la siembra, estos fueron denominados tratamientos con dosis completa. El plan de fertilización según tratamiento se describe en el Tabla 2,

indicando los días después de siembra en los que se aplicó el fertilizante.

TABLA II  
CANTIDAD DE FERTILIZANTE APLICADA POR TRATAMIENTO

| Tratamiento           | Días de cultivo           |                           |                           |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                       | 0                         | 25                        | 40                        |
| T1: Sin Fert          | -                         | -                         | -                         |
| T2: Urea              | 0.46 g urea               | 1.35 g urea               | 0.46 g urea               |
| T3: Urea + DAP        | 0.43 g urea<br>0.23 g DAP | 1.28 g urea<br>0.08 g DAP | 0.43 g urea<br>0.08 g DAP |
| T4: BASACOTE 3M       | 8 g BASACOTE              | -                         | -                         |
| T5: CR media dosis    | 1.139 g urea              | -                         | 1.139 g urea              |
| T6: CR dosis completa | 2.27 g urea               | -                         | -                         |
| T7: CL media dosis    | 1.139 g urea              | -                         | 1.139 g urea              |
| T8: CL dosis completa | 2.27 g urea               | -                         | -                         |

Los tratamientos fueron distribuidos dentro de la casa malla siguiendo un diseño completamente al azar (DCA), cuya aleatorización se realizó mediante el programa FielDHub. Se evaluaron variables de precosecha (altura de planta, peso de masa radical y peso seco de biomasa) y postcosecha (número de vainas por macetero, número y peso de granos por macetero).

Para las variables de precosecha se establecieron dos momentos de muestreo: uno en la etapa de floración y otro en llenado de vainas. Estas variables fueron utilizadas como base para el análisis estadístico inferencial, permitiendo comparar el desempeño agronómico entre tratamientos. Por la naturaleza de estas variables, los muestreos fueron de carácter destructivo. En cada uno de estos muestreos se seleccionaron aleatoriamente tres unidades experimentales por tratamiento, las cuales fueron eliminadas tras la toma de datos.

Como resultado de este esquema, al finalizar el ciclo del cultivo permanecieron tres unidades experimentales por tratamiento, estas fueron utilizadas para la evaluación de las variables de postcosecha.

#### E. Actividades culturales

El riego fue una actividad clave en el manejo del experimento, ya que se buscaba promover la percolación profunda para la obtención de lixiviados. Considerando la textura franca del suelo y los valores de humedad de la Tabla III, se realizaron ensayos para definir una lámina de riego que mantuviera la humedad entre capacidad de campo y saturación. Se estableció una lámina de 5 mm diarios (120 mL por macetero), la cual fue ajustada según el monitoreo diario de humedad. El monitoreo se realizó utilizando un sensor ZENTRA Utility®.

Con base en los valores registrados, se realizaron los ajustes necesarios a la lámina de riego, para mantener la humedad deseada a lo largo de todo el ciclo de cultivo. El riego se suministró diariamente de forma manual, corrigiéndose según la etapa fenológica del cultivo y las condiciones climáticas.

TABLA III  
PORCENTAJES ESTIMADOS DE HUMEDAD SEGÚN TEXTURA DE SUELO

| Textura                | Porcentaje de humedad              |                         |                |
|------------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------|
|                        | Punto de marchitez permanente (MP) | Capacidad de campo (CC) | Saturación (S) |
| Arena                  | 3 - 8                              | 5 - 15                  | 10 - 30        |
| Franco                 | 5 - 10                             | 10 - 20                 | 20 - 40        |
| Franco arena<br>limosa | 7 - 11                             | 14 - 22                 | 28 - 44        |

#### F. Análisis estadístico

Para cada variable cuantitativa se evaluó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk, seleccionada por su robustez en muestras pequeñas ( $n < 50$ ). Cuando los datos cumplieron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para evaluar diferencias entre tratamientos. En aquellos casos en que no se cumplió el supuesto de normalidad, y debido a la cantidad de tratamientos evaluados, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para comparar rangos.

Ya que el experimento se desarrolló en un ambiente controlado, se utilizó un nivel de significancia de  $p < 0.05$ , este enfoque permitió analizar los resultados más allá de los valores promedio, incorporando también la variabilidad de los datos y el respaldo estadístico de las diferencias identificadas. Sin embargo, incluso bajo condiciones controladas, la variabilidad en experimentos agrícolas puede alcanzar valores de hasta un 30%. En este contexto se optó por utilizar una prueba de rango múltiple de Duncan ya que permite una mayor sensibilidad al determinar diferencias.

El análisis estadístico de las variables de precosecha y postcosecha se desarrolló utilizando el programa estadístico InfoStat®.

#### G. Evaluación de la pérdida de nitratos lixiviados

En cada macetero se colocó una bolsa plástica transparente para la recolección de lixiviados. A lo largo del ciclo del cultivo se realizaron tres muestreos de lixiviados. Debido a limitaciones operativas en la recolección simultánea de muestras, se optó únicamente por seleccionar dos unidades experimentales por tratamiento en cada muestreo. Con una muestra de dos unidades ( $n=2$ ), el análisis estadístico resultaría en una estimación poco robusta. Por ello, se optó por realizar un análisis descriptivo de los datos, basado en tendencias y valores observados entre tratamientos a lo largo del tiempo. Debido a la naturaleza del muestreo y la limitada cantidad de mediciones, los datos sobre lixiviados se consideraron como variables complementarias a la interpretación de los resultados agronómicos.

Durante cada muestreo se midió el volumen de lixiviado y se registraron características visuales como el color y la presencia de algas. Posteriormente, las muestras fueron refrigeradas y trasladadas al Laboratorio de Calidad de Agua de

Zamorano, donde se analizaron parámetros fisicoquímicos de temperatura, pH, conductividad, salinidad y sólidos totales disueltos.

Una vez filtradas, las muestras fueron diluidas y acidificadas con 1 ml de ácido clorhídrico por cada 50 ml de muestra para eliminar interferencias. La medición de nitrógeno como nitratos se realizó utilizando un espectrofotómetro UV visible según el procedimiento de SM 4500-NO<sub>3</sub> B, Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method, extraído del Estándar Method for Water Quality [17].

A partir de las concentraciones obtenidas, se calculó la cantidad total de nitrógeno lixiviado por tratamiento, multiplicando la concentración por el volumen recolectado. Con estos valores se construyeron curvas de acumulación, que permitieron analizar la dinámica de pérdida de nitrógeno a lo largo del ciclo del cultivo y comparar la eficiencia de retención entre los fertilizantes evaluados.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Método Estándar para la Preparación de Matriz Polimérica a Partir de $\kappa$ -carragenina y Celulosa.

La formulación de las matrices de  $\kappa$ -carragenina, fue diseñada para obtener 13 cápsulas homogéneas, con 1 cm de diámetro y 1 cm de alto. Al culminar las pruebas preliminares, se determinó que la temperatura óptima para la plancha de calentamiento es de 120 °C. Aunque durante el proceso se pierde algo de calor, esta configuración permite que la mezcla se mantenga dentro de un rango de temperatura entre 70 - 80 °C, adecuado para llevar a cabo la reacción de entrecruzamiento. De forma similar, se determinó 360 rpm como la velocidad adecuada para homogenizar la muestra. Finalmente, la temperatura adecuada para la gelificación de las matrices es de 2 °C en refrigeración. Bajo estas condiciones, las cápsulas pueden desmoldarse tras 20 min, conservando su forma. También se observó que con dosificaciones mayores de urea se requiere mayor tiempo de gelificación.

Las cápsulas pueden incorporar hasta 1.20 g de urea por unidad. Dosis superiores inhiben el proceso de gelificación, a menos que se recurra a temperaturas inferiores a 0 °C, donde las capsulas se deshidratan. Por otra parte, la mezcla base de  $\kappa$ -carrageína y glicerina puede almacenarse en contenedores de vidrio estériles y herméticos por 1 mes bajo refrigeración (2 °C). En estas condiciones, no se observan alteraciones en sus propiedades fisicoquímicas ni en su capacidad de gelificación posterior.

TABLA IV  
METODOLOGÍA ESTÁNDAR PARA ELABORACIÓN DE MATRIZ DE  $\kappa$ -CARRAGENINA

| Categoría                | Descripción                                                                                                                     |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Equipo e instrumentación | Vidrio de reloj                                                                                                                 |
|                          | Balanza analítica                                                                                                               |
|                          | Beaker de 100 ml                                                                                                                |
|                          | Agitador magnético con plancha de calentamiento                                                                                 |
|                          | Termómetro                                                                                                                      |
|                          | Moldes de silicona                                                                                                              |
| Reactivos y materiales   | Espacio de refrigeración a 2 °C                                                                                                 |
|                          | Urea perlada                                                                                                                    |
|                          | Glicerol                                                                                                                        |
|                          | Kappa-carragenina en polvo de grado alimenticio                                                                                 |
| Procedimiento            | Agua destilada                                                                                                                  |
|                          | 1. Pesar 3 g de $\kappa$ -carragenina y 0.3 g de glicerol en un vidrio reloj para obtener una concentración de 10% m/v.         |
|                          | 2. Trasladar a un vaso de precipitado y disolver con 20 ml de agua destilada.                                                   |
|                          | 3. Se añade agua hasta completar 100 ml.                                                                                        |
|                          | 4. Calentar la mezcla y mantenerla en agitación a 300 rpm hasta alcanzar 70 °C medidos con termómetro.                          |
|                          | 5. Colocar en moldes de silicona de 1 cm de diámetro y 1 cm de altura, agregar 1.20 g de urea perlada a cada cápsula y remover. |
|                          | 6. Refrigerar por 20 minutos o hasta que la gelificación se complete.                                                           |
|                          | 7. Almacenar las cápsulas en frascos de vidrio estériles. Vida útil de 7 días.                                                  |

Para el caso de la matriz de celulosa, las cápsulas pueden incorporar hasta 1.20 g de urea por unidad. Si se supera esta dosis, las capsulas resultan ser más pegajosas, necesitando más tiempo de secado al horno. Con la presente formulación pueden obtenerse 15 cápsulas idénticas de 1 cm de diámetro y 1 cm de altura. El material puede mantenerse en refrigeración con una vida útil aproximada de dos semanas, después de este tiempo sus características físicas cambian, volviéndose completamente sólido sin que se dé la oportunidad de incorporar el fertilizante. En la Tabla V se presenta un resumen de los aparatos y reactivos, así como el procedimiento seguido para la elaboración de la matriz de celulosa utilizadas en el experimento.

TABLA V  
METODOLOGÍA ESTÁNDAR PARA ELABORACIÓN DE MATRIZ DE CMC Y HCH

| Categoría                | Descripción                                                                             |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Equipo e instrumentación | Balanza analítica                                                                       |
|                          | Beaker de 100 ml                                                                        |
|                          | Agitador de cabezal                                                                     |
|                          | Moldes de silicona                                                                      |
|                          | Horno                                                                                   |
| Reactivos y materiales   | Urea perlada                                                                            |
|                          | Ácido láctico al 99% (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub> )                    |
|                          | Hidroxietilcelulosa (HEC) grado cosmético                                               |
|                          | Carboximetilcelulosa (CMC) grado alimenticio                                            |
|                          | Ácido cítrico al 100% (C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> ) grado alimenticio |
| Procedimiento            | Agua destilada                                                                          |
|                          | 1. Pesar 3 g de CMC y 1 g de HEC en balanza analítica.                                  |

| Categoría | Descripción                                                                                                                          |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.        | Preparar una solución de ácido láctico al 10% disolviendo 12.94 g en 129.33 ml de agua destilada.                                    |
| 3.        | Disolver las celulosas en la solución de ácido láctico (3% m/v de polímero) y agitar 24 h.                                           |
| 4.        | Añadir 23.539 g de ácido cítrico como agente ligante y agitar otras 24 h.                                                            |
| 5.        | Verter la mezcla en moldes de silicona de 1 cm de diámetro y 1 cm de altura, añadir 1.20 g de urea perlada a cada cápsula y remover. |
| 6.        | Secar a 60 °C en horno por 48 h hasta obtener una matriz flexible y no pegajosa.                                                     |
| 7.        | Almacenar las cápsulas en frascos de vidrio estériles. Vida útil de 2 semanas.                                                       |

La cápsula de celulosa presentó una textura firme al tacto, con buena cohesión estructural y sin presencia de deformaciones evidentes. En comparación, la cápsula elaborada con  $\kappa$ -carragenina que mostró una consistencia gelatinosa, más blanda y susceptible a la deformación bajo presión. En términos de capacidad de absorción de agua, la cápsula de celulosa demostró un mejor rendimiento, con un valor de 0.59 g/g frente a los 0.14 g/g registrados en la matriz de carragenina. Además, la cápsula de celulosa presentó un contenido de humedad significativamente menor (16.9 %) en comparación con el de la cápsula de carragenina (94.12 %), lo cual favorece su estabilidad física y prolonga su vida útil durante el almacenamiento.

Respecto al tiempo de disolución en agua destilada, la cápsula de celulosa también mostró un desempeño superior, con una duración de 14 días, frente a los 10 días observados en la cápsula de carragenina. Estas características indican que la matriz de celulosa ofrece una mayor resistencia mecánica y un mejor control sobre la liberación del fertilizante encapsulado. La velocidad de dilución en agua del material tiene una influencia directa en la liberación del nutriente una vez que las cápsulas se utilicen en campo. Por otro lado, si bien la matriz polimérica de celulosa mostró una mayor capacidad de absorción de agua que la de  $\kappa$ -carragenina, esta diferencia no es significativa en el contexto del presente estudio. Es importante señalar que el objetivo de este trabajo no es utilizar las cápsulas como sistemas de retención hídrica, sino como mecanismos de liberación lenta de nutrientes, priorizando propiedades como la integridad estructural, la resistencia a la deformación y el tiempo de disolución. La Tabla VI muestra un resumen de la caracterización de las matrices.

TABLA VI  
COMPARACIÓN ENTRE MATRIZ DE  $\kappa$ -CARRAGENINA Y HMC Y CMC

| Criterio                               | $\kappa$ -carragenina   | HMC y CMC                    |
|----------------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Descripción                            | Consistencia gelatinosa | Cápsula rígida con orificios |
| Color                                  | Amarillo                | Blanco                       |
| Capacidad de absorción de agua         | 0.14 g/g                | 0.59 g/g                     |
| Humedad del producto final             | 94.12%                  | 16.90%                       |
| Tiempo de disolución en agua destilada | 10 días                 | 14 días                      |

En cuanto a la adaptación del protocolo, se identifica como un aspecto a mejorar la elevada humedad final de la matriz de  $\kappa$ -carragenina, la cual podría comprometer la estabilidad del producto durante su manipulación y almacenamiento. En este sentido, podría contemplarse la inclusión de un proceso de secado posterior a la gelificación o la incorporación de aditivos que fortalezcan la estructura de la cápsula sin alterar su comportamiento funcional.

#### B. Producción de biomasa y rendimiento del cultivo

El análisis estadístico de las variables de crecimiento y rendimiento del cultivo mostró diferencias significativas entre los tratamientos ( $p \leq 0.05$ ) en los días a floración, formación de vainas, longitud de planta y masa radical. Estas variaciones en el comportamiento de los tratamientos se atribuyen a las dos variables independientes consideradas dentro del experimento: el tipo de fertilización y la dosis aplicada al cultivo.

1) *Días a floración y formación de vainas:* Los tratamientos T5 (carragenina media dosis) y T6 (carragenina dosis completa) alcanzaron la etapa de floración de forma anticipada, a los 33 días después de la siembra, siendo estadísticamente similares a T1 (sin fertilización). Según el manual de producción de frijol de USAID [18], el rango esperado de días a floración para la variedad Amadeus 77 se sitúa entre los 36 y 38 días. Esta floración temprana podría estar ligada a una deficiencia leve de nitrógeno [19], dado que la disponibilidad de este nutriente influye en procesos fisiológicos relacionados con el envejecimiento prematuro y la producción de ácido giberélico, una fitohormona que regula la expresión de genes involucrados en la inducción floral [20]. Esta deficiencia leve de nitrógeno en la etapa reproductiva del cultivo (33 días después de la primera fertilización), podría explicarse por la degradación temprana de las cápsulas de carragenina, similar a lo observado en medio acuoso. Causando, de esta forma una liberación acelerada del nitrógeno durante la etapa vegetativa y reduciendo su disponibilidad en la fase reproductiva. En concordancia con los resultados de floración, los tratamientos T5 (carragenina media dosis) y T6 (carragenina dosis completa) fueron los primeros en iniciar la formación de vainas.

Por otro lado, los tratamientos con fertilizantes químicos y aquellos formulados con matrices de celulosa no mostraron diferencias estadísticas significativas entre sí para las variables de días a floración y formación de vainas, manteniéndose todos dentro del rango esperado de floración para la variedad Amadeus 77. Únicamente el tratamiento con T4 (Basacote 3M) presentó una floración tardía, presentando también una formación de vainas demorada.

TABLA VII  
DÍAS A FLORACIÓN Y FORMACIÓN DE VAINAS

| Tratamiento          | Días a floración | Días a formación de vainas |
|----------------------|------------------|----------------------------|
| T1: Sin fertilizante | 35 ± 0.4 ab      | 47 ± 2.1 c                 |
| T2: Urea             | 39 ± 1.4 cd      | 51 ± 2.1 def               |
| T3: Urea+DAP         | 39 ± 0.8 cd      | 52 ± 2.5 ef                |

|                                |          |    |          |   |
|--------------------------------|----------|----|----------|---|
| T4: Basacote 3M                | 40 ± 1.5 | d  | 53 ± 2.4 | f |
| T5: Carragenina dosis media    | 33 ± 1.5 | a  | 45 ± 1.1 | b |
| T6: Carragenina dosis completa | 33 ± 0.9 | a  | 42 ± 1.9 | a |
| T7: Celulosa dosis media       | 38 ± 0.8 | cd | 50 ± 1.4 | c |
| T8: Celulosa dosis completa    | 38 ± 0.6 | bc | 49 ± 1.2 | d |

2) *Masa radical*: Para evaluar la masa radical se realizaron dos muestreos durante el ciclo del cultivo, a los días 42 y 56. En el primer muestreo se denotan diferencias significativas entre los tratamientos, mostrando como el tratamiento T5 (carragenina a dosis media) obtiene valores comparables a los tratamientos con fertilizantes convencionales. El extenso crecimiento radicular de T5 puede explicarse por una leve deficiencia de nitrógeno (N), un fenómeno similar al observado en la variable de floración. La longitud radicular suele aumentar bajo una limitación leve de N, debido a un incremento en la concentración de auxinas en las puntas de las raíces, como respuesta de búsqueda de nutrientes [21]. En el segundo muestreo no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ( $p > 0.05$ ).

TABLA VIII  
MASA RADICAL POR TRATAMIENTO

| Tratamiento                   | Masa Radical 1<br>(g/macetero) |    | Masa Radical 2<br>(g/macetero) |    |
|-------------------------------|--------------------------------|----|--------------------------------|----|
|                               | Día 42                         |    | Día 56                         |    |
| T1: Sin fertilización         | 3.33 ± 0.4                     | a  | 4.33 ± 1.6                     | a  |
| T2: Urea                      | 7.33 ± 0.4                     | b  | 8.00 ± 1.4                     | ab |
| T3: Urea+DAP                  | 7.33 ± 0.4                     | b  | 11.33 ± 3.2                    | b  |
| T4: BASACOTE® 3M              | 5.67 ± 0.9                     | ab | 6.33 ± 0.4                     | ab |
| T5: Carragenina dosis media   | 8.00 ± 2.1                     | b  | 10.33 ± 1.8                    | b  |
| T6 Carragenina dosis completa | 3.33 ± 2.4                     | a  | 8.00 ± 3.7                     | ab |
| T7: Celulosa dosis media      | 3.33 ± 1.2                     | a  | 7.67 ± 3.74                    | ab |
| T8: Celulosa dosis completa   | 3.67 ± 0.9                     | a  | 9.00 ± 0                       | ab |
| Valor P                       | 0.0068                         |    | 0.129                          |    |

3) *Longitud de planta y biomasa área por tratamiento*: En la variable de longitud de planta (Tabla IX), se observaron diferencias significativas en ambos muestreos. En el primer muestreo, el tratamiento con mayor crecimiento fue T3 (urea+DAP), lo cual puede atribuirse a la rápida disponibilidad de nutrientes que proporcionan los fertilizantes convencionales, favoreciendo un desarrollo inicial acelerado.

Sin embargo, en el segundo muestreo, los resultados de los tratamientos con urea encapsulada en matrices poliméricas, tanto de carragenina como de celulosa, son comparables a los obtenidos en T3 (urea+DAP).

TABLA IX  
LONGITUD DE PLANTA POR TRATAMIENTO

| Tratamiento          | LONG 1      |    | LONG 2    |    |
|----------------------|-------------|----|-----------|----|
|                      |             |    |           |    |
| T1: Sin fertilizante | 38 ± 2.1    | a  | 134 ± 1.6 | a  |
| T2: Urea             | 62.67 ± 1.8 | cd | 156 ± 3.2 | ab |

|                                |              |    |           |    |
|--------------------------------|--------------|----|-----------|----|
| T3: Urea+DAP                   | 106.67 ± 3.2 | f  | 169 ± 4.7 | bc |
| T4: BASACOTE® 3M               | 85.67 ± 5.1  | e  | 170 ± 7.3 | bc |
| T5: Carragenina dosis media    | 55.33 ± 2.6  | bc | 175 ± 6.5 | bc |
| T6: Carragenina dosis completa | 53.33 ± 2.3  | b  | 176 ± 7.5 | bc |
| T7: Celulosa dosis media       | 69 ± 6.9     | d  | 169 ± 1.6 | bc |
| T8: Celulosa dosis completa    | 60 ± 4.2     | cb | 172 ± 1.8 | bc |
| Valor p                        | <0.0001      |    | 0.0341    |    |

En el caso de la biomasa aérea, no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos con fertilización convencional y los fertilizados con matrices poliméricas ( $p > 0.05$ ).

TABLA X  
BIOMASA AÉREA POR TRATAMIENTO

| Tratamiento                    | Biomasa aérea (g) |               |
|--------------------------------|-------------------|---------------|
|                                | (27 de marzo)     | (10 de abril) |
| T1: Sin fertilización          | 5.67 ± 0.4        | 7.00 ± 0.8    |
| T2: Urea                       | 10.33 ± 0.4       | 17.67 ± 0.4   |
| T3: Urea+DAP                   | 11.00 ± 0.8       | 20.67 ± 2.3   |
| T4: Basacote                   | 11.67 ± 0.9       | 19.22 ± 0.4   |
| T5: Carragenina dosis media    | 11.67 ± 0.9       | 21.00 ± 1.4   |
| T6: Carragenina dosis completa | 10.67 ± 0.4       | 19.00 ± 2.1   |
| T7: Celulosa media dosis       | 10.67 ± 0.4       | 14.00 ± 4.8   |
| T8: Celulosa dosis completa    | 11.33 ± 0.8       | 18.33 ± 1.2   |
| Valor p                        | 0.1175            | 0.0571        |

Los resultados de longitud y biomasa sugieren un efecto prolongado en la disponibilidad de nitrógeno, asociada al mecanismo de liberación controlada de las matrices, lo que favorece un crecimiento más sostenido en etapas avanzadas del cultivo [22].

4) *Variables agronómicas de cosecha por tratamiento*: En las variables de cosecha evaluadas, el tratamiento T4 (Basacote 3M) presentó un desarrollo limitado. No se cuenta con los datos necesarios para poder desarrollar un análisis profundo de su efecto en el rendimiento y, por tanto, no puede compararse con los demás tratamientos.

En la variable de número de vainas, los resultados de T5 (carragenina dosis media), T7 (celulosa dosis media) y T8 (celulosa dosis completa) son comparables a los resultados presentados por los tratamientos convencionales. En este contexto, T6 (carragenina dosis completa) se presenta como el único tratamiento de fertilización lenta que no logró igualar a la fertilización convencional en la variable de número de vainas. Como se describe en los resultados del procedimiento estándar para generar las matrices poliméricas, el producto final a base de carragenina contiene un mayor nivel de humedad (94.12%) por lo que tiende a ser menos estable estructuralmente, a esto se suma un tiempo de degradación menor comparado al de las matrices de celulosa. Al tener T6 una aplicación única con toda la dosificación de nitrógeno, su liberación sostenida dependería únicamente de la resistencia del material a las condiciones de

campo. Por lo que este terminó por perderse una vez culminada la degradación de la matriz, sin la probabilidad de llegar a abastecer las necesidades del cultivo durante las etapas reproductivas.

Por otro lado, los resultados de T7 y T8 son comparables a los tratamientos convencionales, demostrando que las características estructurales de la matriz influyen de manera importante en la liberación del nutriente. No obstante, el tratamiento de celulosa con dosis media (T7) presentó valores menores en comparación a T8 (celulosa dosis completa). Esta diferencia podría estar asociada a fallas en el almacenamiento del material. Durante la preparación de las matrices de celulosa para la segunda aplicación de T7, se observaron cambios estructurales en el material. Sin embargo, debido a limitaciones materiales no fue posible rehacerlas desde cero. Por ello, no puede asegurarse que las diferencias entre T7 y T8 estén relacionadas al fraccionamiento de la fertilización.

Finalmente, no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos para la variable de peso de grano. Aunque ello podría indicar que las matrices poliméricas resultaron ser igual de efectivas que los fertilizantes convencionales, estos datos deben de interpretarse con cautela al presentar coeficientes de variación iguales o mayores al 30%. Por su baja precisión estadística, no es posible determinar si este resultado es un producto único de los tratamientos o de factores externos que pudieron influir en el desarrollo de las unidades experimentales.

TABLA XI  
VARIABLES AGRONÓMICAS DE COSECHA POR  
TRATAMIENTO

| Tratamiento                    | Número de vainas | Número de granos | Peso de granos |
|--------------------------------|------------------|------------------|----------------|
| T1: Sin fertilización          | 3.33 ± 1.24      | 4.33 ± 0.47      | 1.17 ± 1.16    |
| T2: Urea                       | 4.33 ± 0.94      | 8 ± 3.55         | 1.56 ± 1.55    |
| T3: Urea+DAP                   | 4.00 ± 0.81      | 11.33 ± 2.49     | 1.48 ± 1.47    |
| T4: Basacote 3M                | 0.67 ± 0.94      | 0                | 0              |
| T5: Carragenina dosis media    | 5.00 ± 0.94      | 8.00 ± 4.1       | 2.18 ± 1.18    |
| T6: Carragenina dosis completa | 3.00 ± 0.81      | 10.33 ± 2.62     | 2.09 ± 1.08    |
| T7: Celulosa media dosis       | 4.00 ± 0.81      | 7.67 ± 4.02      | 1.49 ± 1.42    |
| T8: Celulosa dosis completa    | 7.67 ± 1.24      | 11.33 ± 4.49     | 3.84 ± 1.08    |
| Valor P                        | 0.0304           | 0.0245           | 0.964          |

En materia de factores ajenos al control del experimento, se presentaron condiciones ambientales con temperaturas arriba del promedio esperado para marzo y abril de 2025, momento que coincidió con la floración del cultivo (Figura 2). Esto produjo un aborto de flores y una floración tardía una vez estabilizada la temperatura dentro de la casa malla.

A pesar de que se tomaron medidas para controlar la temperatura, esta tuvo un efecto adverso en los datos, generando resultados atípicos de rendimiento para la variedad Amadeus 77. El aumento de temperatura tiene un efecto negativo en la biología reproductiva del frijol, teniendo como resultado menor número de flores, vainas y granos viables [23].

Con lo que respecta a la ausencia de datos de cosecha para el tratamiento T4 (Basacote 3M), esto podría ser resultado de errores al momento de calcular la dosificación para el tratamiento. Una dosificación errónea pudo haber afectado la disponibilidad de nutrientes durante etapas críticas del desarrollo reproductivo. Adicionalmente, debe considerarse que Basacote 3M es un fertilizante de liberación lenta diseñado específicamente para cultivos perennes o de ciclo largo, por lo que su aplicación en un cultivo de ciclo corto como el frijol no es la más adecuada. Sin embargo, se planteó su utilización dentro del experimento ya que era el único fertilizante de liberación lenta recubierto de polímero disponible comercialmente al momento de la investigación.

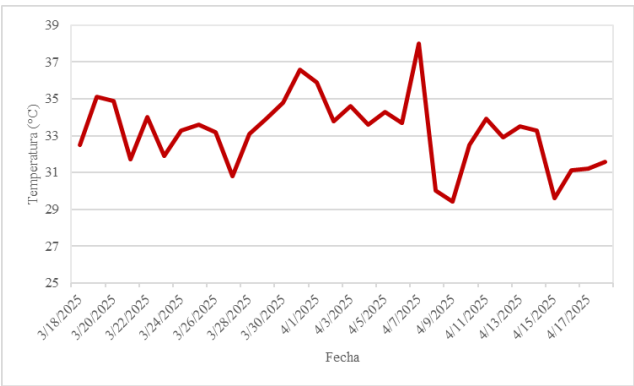


Fig 2. Temperaturas ambientales promedio de marzo-abril 2025.

5) *Evaluación de la Pérdida de Nitrógeno en Forma de Nitrato en los Lixiviados*: La casi nula concentración de N-NO3 en el tratamiento T1 (control), confirma la deficiencia de nitrógeno del suelo tal como fue expresado en los análisis realizados por el Laboratorio de Suelos de Zamorano.

Al comparar los tratamientos entre sí, se puede notar como el tratamiento T2 (urea) presentó la mayor cantidad de nitratos lixiviados. Registrando el mayor punto de lixiviación en el muestreo del 8 de abril, coincidiendo con la aparición de la tercera hoja trifoliada. Por otro lado, T3 (urea + DAP) presentó una menor lixiviación de nitratos en comparación a T2, esto a pesar de ser un tratamiento químico convencional. La explicación para estos resultados se encuentre en la diferencia de solubilidad del DAP y la urea. En el tratamiento T3 parte del nitrógeno es aportado por el DAP, que es mucho menos soluble, por ello es natural asumir que presente menos lixiviados de nitratos.

De manera similar, al comparar los tratamientos convencionales con los tratamientos de matrices poliméricas, los primeros presentan mayor lixiviación de nitratos. Ambas



observaciones demuestran como las características de los fertilizantes influyen en la absorción de nutrientes por parte del cultivo.

Por otro lado, al comparar los tratamientos de liberación lenta entre sí, podemos notar como es el tratamiento T6 (carragenina dosis completa) el que presenta mayor pérdida de N-NO<sub>3</sub>, mostrando un pico de lixiviación en el muestreo de abril 22, coincidiendo con la floración. T5 (carragenina dosis media) muestra un patrón de lixiviación completamente distinto al de su análogo con dosis completa. En este caso, las características de la capsulas en combinación a las dosificaciones de cada tratamiento y su momento de aplicación influyeron en el comportamiento de lixiviación.

Como se mostró en secciones anteriores, las capsulas de carragenina presentaron mayor humedad en el producto final, acortando el tiempo que tardan en disolverse las capsulas. Basándonos en estas características y la evidencia de una lixiviación repentina de N-NO<sub>3</sub> en el segundo punto de muestreo, se puede sugerir una ruptura abrupta de la capsula, excediendo los requerimientos nutricionales de la planta y culminando en una mayor pérdida del fertilizante en forma de N-NO<sub>3</sub>. Este fenómeno se ha registrado en otras investigaciones [24], donde en ocasiones la liberación de nutrientes no puede sincronizarse con los requisitos de la planta y da como resultado una liberación inmediata, lo que se denomina “burst effect” o efecto de explosión. Para prevenir este comportamiento en experimentos futuros, debería de priorizarse reducir la humedad final de las matrices de κ-carragenina. En la misma línea, T5 (carragenina media dosis) no exhibe este comportamiento debido a que la dosificación de nitrógeno se dividió en dos momentos de aplicación, siendo estas cantidades adecuadas para los requerimientos de cada etapa.

En el caso de las capsulas de celulosa, los tratamientos T7 (celulosa media dosis) y T8 (celulosa dosis completa), presentaron pendientes poco pronunciadas, indicando patrones de liberación controlada, sin momentos de liberación abrupta.

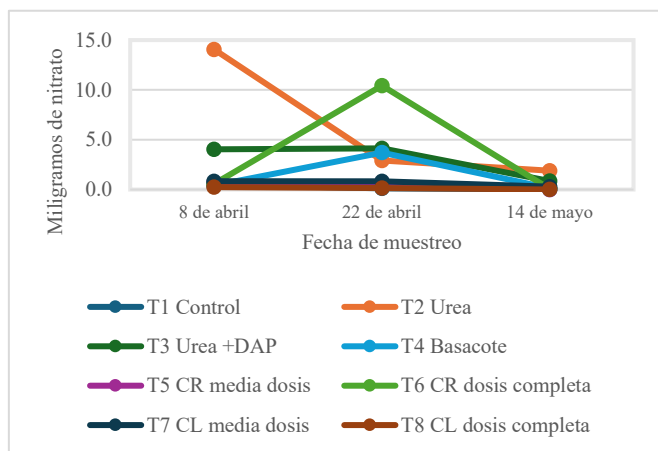


Fig 4. Curvas de liberación de nitrógeno como nitrato

#### IV. CONCLUSIONES

Al aplicar los protocolos establecidos, se obtuvieron capsulas homogéneas capaces de reducir la tasa de liberación de urea en la mayoría de los tratamientos. Para el caso particular del tratamiento de carragenina de dosis completa, la metodología establecida resultó ser menos efectiva, estando esto probablemente relacionado a la humedad final del producto.

Los fertilizantes de matriz hechos a partir de carragenina y celulosa, mostraron comportamiento similar al de los fertilizantes convencionales en variables como longitud, biomasa aérea y masa radical dentro de las condiciones del ensayo, lo que apunta a su potencial como alternativa de fertilización. Sin embargo, se requieren estudios complementarios antes de afirmar su eficiencia en sistemas productivos reales.

Al comparar la tasa de liberación de nutrientes de las matrices, la matriz de celulosa mostró una mayor eficiencia en la reducción de N-NO<sub>3</sub> lixivados a lo largo del ciclo productivo. Esto podría ligarse a un patrón de liberación controlada que se acopla a las necesidades nutricionales de la planta según su etapa fenológica. Sin embargo, debido al deterioro observado en el material durante un período corto de almacenamiento, se necesita estudiar más a detalle sus características de degradabilidad antes de definirlo como una opción viable de liberación lenta de nutrientes.

#### V. RECOMENDACIONES

Se recomienda repetir el experimento durante la época lluviosa, donde las condiciones de temperatura y humedad sean favorables para el desarrollo del cultivo. Esto permitirá reducir la influencia de factores externos en el desarrollo del experimento. De manera similar, podría optarse por analizar variables distintas a las evaluadas en este ensayo. Permitiendo describir nuevas características de los fertilizantes en matriz.

Se recomienda estudiar el comportamiento de las matrices poliméricas utilizadas durante este experimento en conjunto a otros fertilizantes químicos, como podría ser DAP o KCL, cuyas propiedades fisicoquímicas difieren a las de la urea, pudiéndose obtener fertilizantes de liberación lenta con nuevas características de liberación.

Finalmente se recomienda estudiar a profundidad las características fisicoquímicas y de degradabilidad de las matrices poliméricas. Aunque retardaron la liberación del nutriente aún existen puntos de mejora en materia estructural para las cápsulas de carragenina y de durabilidad para las capsulas de celulosa.

#### REFERENCIAS

- [1] R. Scotti, G. Bonanomi, R. Scelza, A. Zoina, and M. Rao, “Organic amendments as sustainable tool to recovery fertility in intensive agricultural systems,” *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, ahead of print, 2015, doi: 10.4067/S0718-95162015005000031. R. Lal, “Restoring

- soil quality to mitigate soil degradation,” *Sustainability*, vol. 7, no. 5, pp. 5875–5895, 2015, doi: 10.3390/su7055875.
- [2] R. Lal, “Restoring soil quality to mitigate soil degradation,” *Sustainability*, vol. 7, no. 5, pp. 5875–5895, 2015, doi: 10.3390/
  - [3] P. Krasilnikov, M. A. Taboada, and Amanullah, “Fertilizer use, soil health and agricultural sustainability,” *Agriculture*, vol. 12, no. 4, p. 462, 2022, doi: 10.3390/agriculture12040462.
  - [4] S. N. Singh and A. Verma, “Environmental review: The potential of nitrification inhibitors to manage the pollution effect of nitrogen fertilizers in agricultural and other soils: A review,” *Environmental Practice*, vol. 9, no. 4, pp. 266–279, 2007, doi: 10.1017/S1466046607070482.
  - [5] N. L. Kartini, M. Saifulloh, N. M. Trigunasih, N. M. S. Sukmawati, and I. M. Mega, “Impact of long-term continuous cropping on soil nutrient depletion,” *Ecological Engineering & Environmental Technology*, vol. 25, no. 11, pp. 18–29, 2024, doi: 10.12912/27197050/191953.
  - [6] X. Li, Q. Li, X. Xu, Y. Su, Q. Yue, and B. Gao, “Characterization, swelling and slow-release properties of a new controlled release fertilizer based on wheat straw cellulose hydrogel,” *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 60, pp. 564–572, 2016, doi: 10.1016/j.jtice.2015.10.027.
  - [7] C. Wang et al., “Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: A mini review,” *Environmental Science and Ecotechnology*, vol. 10, p. 100167, 2022, doi: 10.1016/j.ese.2022.100167.
  - [8] H. Di et al., “Preparation and nutrient release characteristics of liquefied apple tree branch-based biocoated large tablet urea,” *ACS Omega*, vol. 8, no. 11, pp. 9775–9784, 2023, doi: 10.1021/acsomega.2c04674.
  - [9] R. A. Ramli, “Slow-release fertilizer hydrogels: A review,” *Polymer Chemistry*, vol. 10, no. 45, pp. 6073–6090, 2019, doi: 10.1039/C9PY01036J.
  - [10] I. Kassem et al., “Biodegradable all-cellulose composite hydrogel as eco-friendly and efficient coating material for slow-release MAP fertilizer,” *Progress in Organic Coatings*, vol. 162, p. 106575, 2022, doi: 10.1016/j.porgcoat.2021.106575.
  - [11] R. Ahmed et al., “Biochar effects on mineral nitrogen leaching, moisture content, and evapotranspiration after <sup>15</sup>N urea fertilization for vegetable crop,” *Agronomy*, vol. 9, no. 6, p. 331, 2019, doi: 10.3390/agronomy9060331.
  - [12] (Trirahayu et al., 2022)
  - [13] R. A. Ramli, “Slow-release fertilizer hydrogels: A review,” *Polymer Chemistry*, vol. 10, no. 45, pp. 6073–6090, 2019, doi: 10.1039/C9PY01036J.
  - [14] J. K. Ávila Viatela, *Diseño de un hidrogel de carragenina optimizado para el recubrimiento de fertilizantes NPK*, M.S. thesis, Univ. Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia, 2017.
  - [15] S. Durpekova, A. Di Martino, M. Dusankova, P. Drohsler, and V. Sedlarik, “Biopolymer hydrogel based on acid whey and cellulose derivatives for enhancement water retention capacity of soil and slow release of fertilizers,” *Polymers*, vol. 13, no. 19, 2021, doi: 10.3390/polym13193274.
  - [16] R. Lardizabal, S. Arias, and R. Segura, *Manual de Producción de Frijol*, 2013.
  - [17] R. Baird, A. Eaton, and E. Rice, Eds., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Washington, DC, USA: APHA, 2015.
  - [18] R. Lardizabal, S. Arias, and R. Segura, *Manual de Producción de Frijol*, 2013.
  - [19] T. C. de Bang et al., “The molecular-physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants,” *New Phytologist*, vol. 229, no. 5, pp. 2446–2469, 2021, doi: 10.1111/nph.17074.
  - R. Castro-Camba, C. Sánchez, N. Vidal, and J. M. Vielba, “Plant development and crop yield: The role of gibberellins,” *Plants*, vol. 11, no. 19, 2022, doi: 10.3390/plants11192650.
  - [20] R. Castro-Camba, C. Sánchez, N. Vidal, and JM Vielba, “Plant development and crop yield: The role of gibberellins,” *Plants*, vol. 11, no. 19, 2022, doi: 10.3390/plants11192650.
  - [21] T. C. de Bang et al., “The molecular-physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants,” *New Phytologist*, vol. 229, no. 5, pp. 2446–2469, 2021, doi: 10.1111/nph.17074.
  - [22] W. A. El-Tohamy, AA Ghoname, GS Riad, and SD Abou-Hussein, “The influence of slow-release fertilizer on bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.) grown in sandy soils,” *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 966–969, 2009.
  - [23] D.A. da Silva et al., “Influence of high temperature on the reproductive biology of dry edible bean (*Phaseolus vulgaris* L.),” *Scientia Agricola*, vol. 77, no. 3, Art. no. e20180233, 2020, doi: 10.1590/1678-992X-2018-0233.
  - [24] D. Lawrence et al., “Controlled release fertilizers: A review on coating materials and mechanism of release,” *Plants*, vol. 10, no. 2, p. 238, 2021, doi: 10.3390/plants10020238.