



Respuestas morfofisiológicas tempranas del arroz (*Oryza sativa*, variedad generosa) a la fertilización diferencial con N, P y K en suelos de distinta textura en la Granja Agroecológica UNIMINUTO.

Mithzy Dayana Dedios Martín

Laura Natalia Vargas Pisco

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Oriente

Centro Universitario Villavicencio (Meta)

Programa Ingeniería Agroecológica

Noviembre de 2025

Respuestas morfofisiológicas tempranas del arroz (*Oryza sativa*, variedad generosa) a la fertilización diferencial con N, P y K en suelos de distinta textura en la Granja Agroecológica UNIMINUTO.

Mithzy Dayana Dedios Martín ID: 815683

Laura Natalia Vargas Pisco ID: 808705

Línea de investigación

SUBLÍNEA 4. Gestión integral del recurso hídrico GIRH y manejo de suelos

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero en Agroecología

Asesora:

Andrea Del Pilar Gómez Hernández Ph. D.

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Oriente

Centro Universitario Villavicencio (Meta)

Programa Ingeniería Agroecológica

Noviembre de 2025

Acta de aprobación

Dedicatoria

Primeramente, a Dios, por guiar cada paso de este camino académico y personal, por ser fuente de sabiduría y brindarnos la fortaleza necesaria para afrontar todas las dificultades que se presentaron.

A nuestras familias, por su amor, comprensión, sacrificios, paciencia y apoyo incondicional. Su motivación constante fue lo que nos mantuvo firmes y perseverantes frente a los obstáculos y el cansancio a lo largo de este proceso.

A nuestros docentes, por su compromiso y dedicación. Gracias por compartir sus conocimientos, los cuales enriquecieron este proceso tanto académico como personal, impulsándonos a explorar nuevos horizontes y desarrollar habilidades valiosas para nuestra vida futura.

Dayana y Laura

Agradecimientos

Agradecemos a la Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO, cuyo respaldo académico, logístico y financiero hizo posible esta tesis. En especial, al proyecto CIC223-460-5998 “Implementación de sistemas de riego avanzados y uso de aguas pluviales para la agricultura sostenible en la Granja Agroecológica UNIMINUTO”, financiado mediante convocatoria interna, que proporcionó los recursos necesarios para su desarrollo.

También extendemos nuestro reconocimiento a:

- *Semillano S.A. por su interés y apoyo en la investigación proporcionando la semilla base de este estudio*
- *La profesora Diana Carolina Pabón por sembrar y nutrir el proyecto*
- *El Semillero de Investigación Kaliawirinae por su compromiso y trabajo colaborativo.*
- *La Granja Agroecológica UNIMINUTO, por facilitar el espacio para la experimentación, montaje y ejecución de las pruebas necesarias.*
- *La profesional Mélida Buitrago, por su constante apoyo técnico en el laboratorio.*
- *El señor Juan Rico, por compartir su conocimiento agrícola y su valiosa orientación en campo.*
- *FUNDASES, por sus servicios profesionales en el análisis de muestras ambientales, realizados con altos estándares de calidad.*
- *Sara Stefanía Camacho, por su gestión diligente en los procesos de compras, cotizaciones y asesoría financiera del proyecto.*
- *La profesora Lenith Cárdenas, por su apoyo incondicional desde la concepción del proyecto hasta su finalización.*
- *Doña Vero, por el “tintico”, la limonada y su comida que nos recomfortaron en varias jornadas.*

*A todas las personas que, directa o indirectamente, hicieron parte de este proceso:
gracias por su valiosa contribución a esta investigación aplicada, con impacto para la región y
para Colombia.*

Resumen

Este estudio evaluó la absorción de potasio, fósforo y nitrógeno en tres tipos de sustrato (arenoso, arcilloso y limoso) y su efecto sobre el desarrollo temprano del arroz variedad Generosa. Se aplicaron concentraciones crecientes de cada nutriente bajo condiciones controladas, y se midieron variables morfofisiológicas como la longitud de raíz, la longitud de hoja y la biomasa acumulada.

Los resultados mostraron que el potasio favoreció el aumento de biomasa hasta un umbral de aproximadamente 40 mg/L, pero redujo la longitud radicular con dosis elevadas. El fósforo presentó un margen estrecho entre suficiencia y toxicidad, ya que concentraciones superiores a 20 mg/L disminuyeron tanto la biomasa como la elongación foliar. El nitrógeno promovió el crecimiento de las hojas hasta los 160 mg/L, pero redujo la biomasa total cuando estuvo presente en exceso.

La textura del sustrato moduló estas respuestas fisiológicas. Los suelos arenosos favorecieron la elongación radicular y foliar a bajas dosis, mientras que los suelos limosos y arcillosos promovieron una mayor acumulación de biomasa debido a su capacidad de retención. Los modelos no lineales aplicados (logístico y Bradley) permitieron identificar umbrales fisiológicos precisos y describir patrones diferenciados de respuesta a los nutrientes.

Se concluye que las dosis convencionales de fertilización pueden estar sobredimensionadas respecto a las necesidades reales del cultivo en sus primeras etapas. Por ello, se propone avanzar hacia estrategias de manejo específico por sitio (SSNM), ajustadas a la textura del suelo, con el fin de optimizar el uso de insumos, reducir pérdidas y fomentar una producción de arroz más sostenible.

Palabras clave: absorción de nutrientes, arroz, biomasa, fertilización, modelos no lineales, textura del suelo, variables morfofisiológicas.

Abstract

This study evaluated the absorption of potassium, phosphorus, and nitrogen in three types of substrates (Arenoso, Arcilloso, and Limoso) and their effect on the early development of rice (Generosa variety). Increasing concentrations of each nutrient were applied under controlled conditions, and morphophysiological variables such as root length, leaf length, and biomass accumulation were measured.

Results showed that potassium increased biomass up to a saturation threshold of approximately 40 mg/L, but reduced root length at higher concentrations. Phosphorus exhibited a narrow margin between sufficiency and toxicity, with concentrations above 20 mg/L decreasing both biomass and leaf elongation. Nitrogen stimulated leaf growth up to 160 mg/L, but excessive amounts led to a reduction in total biomass.

Soil texture significantly influenced these physiological responses. Arenoso substrates enhanced root and leaf development at lower nutrient doses, while Limoso and Arcilloso substrates promoted greater biomass accumulation due to their higher retention capacity. The application of nonlinear models (logistic and Bradley) enabled the identification of physiological thresholds and differentiated response patterns across treatments.

The findings suggest that conventional fertilization doses may exceed the actual nutritional requirements of rice during early growth stages. Therefore, the study recommends the adoption of site-specific nutrient management (SSNM) strategies tailored to soil texture, to improve input efficiency, reduce losses, and promote sustainable rice production.

Keywords: biomass, fertilization, morphophysiological variables, nonlinear models, nutrient absorption, rice, soil texture.

Tabla de Contenido

Acta de aprobación	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	v
Abstract.....	vii
Lista de Tablas.....	xi
Lista de Figuras	i
Lista de Anexos	ii
Introducción	1
CAPÍTULO I.....	3
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Pregunta de investigación	4
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. Justificación.....	5
CAPITULO II.....	7
2.1. Marco Teórico	7
2.1.1. Absorción de nutrientes y eficiencia morfofisiológica del cultivo	7
2.1.2. Modelos no lineales para describir la respuesta fisiológica de las plantas a nutrientes.....	7
2.1.3. Textura del suelo y dinámica de nutrientes.....	8
2.2. Antecedentes y Contexto.....	9
2.2.1. Importancia del arroz como cultivo modelo.....	9
2.2.2. Estudios similares previos	9
2.3. Marco conceptual	10
CAPITULO III.....	14
3.1. Tipo y enfoque de investigación	14
3.2. Área y condiciones del experimento.....	15
3.2.1. Ubicación geográfica y características edafoclimáticas	15
3.2.2. Condiciones ambientales en el área experimental.....	15
3.3. Diseño experimental.....	16

3.3.1.	Estructura del diseño bifactorial	16
3.3.2.	Asignación de tratamientos y distribución de macetas	18
3.3.3.	Justificación estadística del muestreo	18
3.4.	Materiales y métodos	19
3.4.1.	Preparación de sustratos y caracterización física	19
3.4.2.	Cultivo del arroz.....	21
3.4.3.	Preparación de soluciones nutritivas	22
3.4.4.	Aplicación de tratamientos y recolección de lixiviados	25
3.5.	Variables Medidas	25
3.5.1.	Longitud de la raíz	26
3.5.2.	Biomasa Total.....	28
3.5.3.	Longitud de hoja	29
3.6.	Análisis Estadístico.....	30
3.6.1.	ANOVA bifactorial con submuestreo.....	30
3.6.2.	Pruebas post hoc (Tukey HSD)	31
3.6.3.	Estimación de varianza explicada.....	31
3.6.4.	Ajuste de modelos no lineales	31
3.6.5.	Evaluación de R^2 , parámetros y coherencia morfofisiológica	33
CAPÍTULO IV		34
4.1.	Respuesta a potasio (K^+)	34
4.1.1.	Longitud de la raíz	34
4.1.2.	Biomasa Total.....	39
4.2.	Respuesta a fósforo	44
4.2.1.	Longitud de la raíz	44
4.2.2.	Biomasa Total.....	49
4.3.	Respuesta a nitrógeno (N).....	59
4.3.1.	Longitud de la raíz	59
4.3.2.	Biomasa	65
CAPÍTULO V		76
5.1.	Discusión de Resultados.....	76
5.1.1.	Efecto del potasio (K^+) en la longitud radicular y la biomasa de arroz.....	76
5.1.2.	Efecto del fósforo (P) en la longitud foliar y la biomasa de arroz.....	78
5.1.3.	Efecto del nitrógeno (N) en la longitud foliar y la biomasa de arroz.....	80

5.2. Comparación de las cargas nutricionales aplicadas con estándares nacionales e internacionales.....	83
Conclusiones	90
Bibliografía.....	92
Anexos.....	98

Lista de Tablas

Tabla 1	19
Tabla 2	22
Tabla 3	84
Tabla 4	86

Lista de Figuras

Figura 1. Longitud radicular de plántulas de arroz en función de la concentración de potasio suministrado en solución acuosa.	34
Figura 2. Biomasa de plántulas de arroz en función de la concentración de potasio suministrado en solución acuosa.	39
Figura 3. Longitud foliar de plántulas de arroz en función de la concentración de fósforo suministrado en solución acuosa.	45
Figura 4. Biomasa de plántulas de arroz en función de la concentración de fósforo suministrado en solución acuosa.	55
Figura 5. Longitud foliar de plántulas de arroz en función de la concentración de nitrógeno suministrado en solución acuosa.	60
Figura 6. Biomasa de plántulas de arroz en función de la concentración de nitrógeno suministrado en solución acuosa.	71

Lista de Anexos

Figura A 1. Curva de calibración concentración del potasio vs. conductividad eléctrica (EC) y sólidos disueltos totales (TDS).....	98
Figura A 2. Curva de calibración concentración del fósforo vs. conductividad eléctrica (EC) y sólidos disueltos totales (TDS).....	99
Figura A 3. Curva de calibración concentración del nitrógeno vs. conductividad eléctrica (EC) y sólidos disueltos totales (TDS).....	99
Tabla A1	98
Tabla A2	99
Tabla A3	99
Tabla A 4	101
Tabla A 5	101
Tabla A 6	102
Tabla A 7	103
Tabla A 8	104
Tabla A 9	105
Tabla A 10	106
Tabla A 11	107
Tabla A 12	108
Tabla A 13	109
Tabla A 14	110
Tabla A15	111
Tabla A16	112
Tabla A17	112

Tabla A18	112
-----------------	-----

Introducción

En las últimas décadas, el crecimiento poblacional, la presión sobre los recursos naturales y el cambio climático han impulsado la búsqueda de prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles (Altieri & Nicholls, 2020; IPCC, 2021). En este contexto, la gestión racional de nutrientes y del agua en cultivos estratégicos como el arroz se ha vuelto una prioridad para asegurar la seguridad alimentaria y reducir el impacto ambiental de la agricultura intensiva.

El arroz (*Oryza sativa* L.) es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial (Fukagawa & Ziska, 2019), siendo fuente de energía para aproximadamente el 50 % de la población mundial (Tagliapietra et al., 2024). Su capacidad de adaptación le permite crecer en una amplia variedad de condiciones climáticas, desde regiones tropicales hasta templadas, y en altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 2.500 metros.

En los Llanos Orientales de Colombia, el cultivo de arroz representa una actividad agrícola fundamental, aunque enfrenta desafíos persistentes relacionados con la fertilización y el manejo del recurso hídrico (Gerencia Corporativa de Analítica y Estudios Económicos, 2022). En la región, es común el uso de prácticas empíricas que carecen de precisión, lo que genera pérdidas por ineficiencia en el uso del agua y los nutrientes, además de impactos negativos sobre el medio ambiente.

Por tal motivo, el presente estudio se enfoca en analizar las respuestas morfofisiológicas tempranas del arroz (variedad Generosa) frente a la aplicación diferencial de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en suelos de distinta textura: arenosa, limosa y arcillosa, bajo condiciones controladas. A diferencia de investigaciones centradas únicamente en el

rendimiento final (Sandhu et al., 2019), este trabajo aborda las fases iniciales del desarrollo del cultivo —emergencia y crecimiento vegetativo temprano—, las cuales son determinantes para el establecimiento del potencial de rendimiento, la formación del sistema radicular (Meng et al., 2019) y la eficiencia en la absorción de nutrientes (Julia et al., 2018).

Mediante un enfoque experimental y el uso de modelos no lineales, se busca establecer umbrales óptimos de absorción y describir cómo la textura del suelo influye en la respuesta fisiológica del cultivo ante diferentes concentraciones de nutrientes. Se espera que estos resultados aporten evidencia útil para futuras investigaciones y contribuyan al desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes.

CAPÍTULO I

1.1. Planteamiento del problema

En la región de los Llanos Orientales, el cultivo de arroz se fertiliza comúnmente con base en estimaciones empíricas derivadas de uno o muy pocos muestreos de suelo. A partir de estos, se determinan carencias aparentes de nutrientes y se aplican fertilizantes sin una dosificación precisa, lo que conlleva prácticas de fertilización poco eficientes. Posteriormente, el método de riego más común es la inundación, que implica el desvío temporal de cauces para cubrir los lotes de siembra. Una parte de esta agua se infiltra junto con los nutrientes aplicados, mientras que el excedente retorna al cauce original, arrastrando nutrientes no absorbidos y generando procesos de contaminación hídrica y pérdida económica (Acosta Bohórquez, 2021; Carrillo et al., 2020; Degiovanni et al., 2010; Solano Guzmán, 2016).

El riego por inundación, si bien ha sido asociado con altos niveles de producción, representa un uso intensivo y poco eficiente del recurso hídrico. Se estima que producir un kilogramo de arroz puede requerir entre 3.000 y 5.000 litros de agua (Tuong & Bouman, 2003). Esta situación resulta insostenible en el contexto actual de cambio climático, eventos extremos de sequía y creciente escasez de agua (Domínguez-Vento, 2025).

Más allá de la ineficiencia hídrica, la falta de precisión en la aplicación de nutrientes genera pérdidas agronómicas y ambientales (Carranza-Patiño et al., 2024), especialmente en suelos con distintas texturas, donde el comportamiento de adsorción y absorción varía considerablemente (Bautista & Aguilera, 2023). Sin embargo, en muchas zonas rurales no se cuenta con la infraestructura ni los recursos técnicos para realizar análisis detallados de suelos o para medir la eficiencia real de la fertilización (Angulo Sanchez, 2023).

Aunque buena parte de la literatura sobre nutrición del arroz se enfoca en el rendimiento de grano, diversos estudios reconocen que las etapas iniciales del cultivo —específicamente la emergencia y la fase vegetativa temprana— son determinantes para el establecimiento del potencial de rendimiento, la estructura radicular, y la eficiencia en la absorción de nutrientes (Brandeberry, 2022; Linscombe, 2016). Ignorar estas fases puede ocultar información clave sobre cómo interactúan los factores edáficos y nutricionales en los primeros días del desarrollo del cultivo. Aun así, muchos estudios no especifican con claridad la etapa fenológica en la que se evalúan las variables fisiológicas, lo cual representa una limitación metodológica que este trabajo busca superar.

1.2. Pregunta de investigación

¿Cómo varía la absorción de potasio, fósforo y nitrógeno por las plántulas de arroz (*Oryza sativa*), en función de la textura del suelo y la concentración aplicada del nutriente, evaluada mediante variables morfológicas bajo condiciones controladas?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la absorción de potasio, fósforo y nitrógeno por plántulas de arroz (*Oryza sativa*, variedad Generosa) en suelos de diferentes texturas, utilizando variables morfológicas como indicadores fisiológicos y aplicando modelos no lineales para establecer umbrales óptimos de fertilización en condiciones controladas.

1.3.2. Objetivos específicos

- a. Evaluar el efecto de diferentes concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio sobre la biomasa, longitud de raíz y longitud foliar del arroz.
- b. Determinar la influencia de la textura del sustrato (arenosa, arcillosa y limosa) sobre la respuesta fisiológica de las plántulas a los nutrientes aplicados.
- c. Ajustar modelos de regresión no lineales para describir la dinámica de absorción y establecer umbrales fisiológicos de respuesta según la textura del sustrato.
- d. Comparar los resultados obtenidos con las recomendaciones de fertilización convencionales y discutir su pertinencia en el contexto de un manejo nutricional sostenible y localizado.

1.4. Justificación

Este estudio se propone contribuir a la sostenibilidad del cultivo de arroz en condiciones rurales, mediante un diseño experimental que evalúa la absorción de nutrientes en las etapas iniciales del desarrollo del cultivo, específicamente durante la emergencia y el crecimiento vegetativo temprano. Esta elección metodológica responde a la evidencia de que dichas fases son críticas para la definición del potencial de crecimiento y absorción del arroz, y que condicionan el éxito de las etapas posteriores del cultivo (Linscombe, 2016).

Al centrar la evaluación en las respuestas fisiológicas tempranas —biomasa, longitud de hoja y longitud de raíz—, el estudio se aleja del enfoque tradicional centrado en el rendimiento final, y se enfoca en entender cómo la textura del suelo y la dosis de nutrientes influyen desde los primeros días del cultivo. Esta perspectiva permite generar indicadores fisiológicos

tempranos, útiles para el ajuste fino de prácticas de fertilización sin necesidad de esperar hasta el final del ciclo.

Además, el trabajo se alinea con la necesidad de metodologías accesibles y adaptadas a contextos rurales, donde no se dispone de tecnología avanzada para monitoreo nutricional. El uso de modelos de regresión no lineal (e.g., logístico y Bradley) permite describir con precisión las respuestas del cultivo sin requerir infraestructura costosa, facilitando la toma de decisiones informadas desde etapas tempranas.

Así, el enfoque del estudio tiene una doble relevancia: científica, al ofrecer un marco metodológico riguroso centrado en etapas clave del desarrollo vegetal; y agroecológica, al contribuir al uso racional de insumos, la adaptación al territorio y la promoción de sistemas agrícolas sostenibles. El proyecto, desarrollado en la Granja Agroecológica UNIMINUTO, tiene además un valor replicable en escenarios educativos y productivos, y se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 2 (Hambre cero) y el ODS 12 (Producción y consumo responsables).

CAPITULO II

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Absorción de nutrientes y eficiencia morfofisiológica del cultivo

La absorción de nutrientes esenciales como el potasio, fósforo y nitrógeno es un proceso fundamental para el desarrollo óptimo del arroz (*Oryza sativa*), un cultivo altamente demandante de estos elementos. Para que los nutrientes estén disponibles a la planta, deben encontrarse disueltos en la solución del suelo y ser transportados hasta las raíces mediante procesos que dependen de la energía metabólica. Esta dinámica está influenciada por propiedades edáficas como la textura, el pH, la estructura y la capacidad de intercambio catiónico del suelo, que regulan tanto la disponibilidad como la movilidad de los nutrientes (Weil & Brady, 2017).

Las pérdidas de nutrientes por adsorción excesiva en partículas del suelo o por lixiviación limitan su disponibilidad para la planta. En suelos de baja retención, como los arenosos, es común observar pérdidas importantes de nitrógeno y potasio. Por el contrario, en suelos arcillosos, la retención puede ser tan alta que los nutrientes quedan inmovilizados. Esta complejidad hace necesario el uso de modelos que permitan cuantificar e interpretar cómo la planta responde fisiológicamente a diferentes concentraciones de nutrientes según la textura del suelo.

2.1.2. Modelos no lineales para describir la respuesta fisiológica de las plantas a nutrientes

Las respuestas fisiológicas de las plantas frente a nutrientes como el fósforo o el potasio no suelen ser lineales, especialmente cuando se evalúan en un rango amplio de

concentraciones. En condiciones experimentales, es común observar una curva tipo sigmoidea o logarítmica, en la que existe una fase de incremento rápido, seguida por una meseta o saturación. Para describir este comportamiento, se emplean modelos de regresión no lineales, entre los que destacan los modelos logísticos, exponenciales, o transformaciones log-log.

En este estudio se utilizaron modelos del tipo logístico y modelos del tipo Bradley para representar la relación entre la concentración aplicada de nutrientes y la biomasa o longitud de hoja. Estos modelos permiten estimar umbrales fisiológicos como el punto de inflexión o el valor máximo de respuesta, lo cual resulta útil para formular estrategias de fertilización más eficientes y específicas para cada tipo de suelo.

2.1.3. Textura del suelo y dinámica de nutrientes

La textura del suelo afecta profundamente la retención, movilidad y disponibilidad de los nutrientes aplicados.

Suelos arcillosos: Tienen una alta capacidad de retención de agua y nutrientes, pero también una baja tasa de infiltración y alta propensión al encharcamiento. Esto puede limitar la oxigenación radicular y ralentizar el crecimiento (Hillel & Warrick, 1998).

Suelos limosos: poseen características intermedias. Su estructura favorece tanto la retención como la infiltración, siendo considerados óptimos para una amplia gama de cultivos.

Suelos arenosos: Tienen baja capacidad de retención hídrica y nutricional. Esto favorece el drenaje, pero incrementa el riesgo de lixiviación y deficiencias nutricionales, sobre todo en cultivos exigentes como el arroz (Fageria et al., 2003).

Evaluar la respuesta de la planta bajo estas condiciones permite establecer criterios más precisos sobre el tipo de suelo más apto para determinadas estrategias de fertilización.

2.2. Antecedentes y Contexto

2.2.1. Importancia del arroz como cultivo modelo

El arroz es uno de los cereales más cultivados y consumidos a nivel mundial, superado solo por el trigo. En Colombia, especialmente en los Llanos Orientales, constituye una de las principales actividades agropecuarias (Fedearroz, 2021). Su demanda por nutrientes y agua, así como su sensibilidad a las condiciones edáficas, lo convierten en un excelente modelo experimental para evaluar la eficiencia de absorción en distintos tipos de suelos.

Además, el arroz es un cultivo prioritario dentro de los sistemas agroecológicos locales, lo cual refuerza su pertinencia dentro de los procesos formativos y de investigación en instituciones comprometidas con la sostenibilidad y la seguridad alimentaria.

2.2.2. Estudios similares previos

Diversas investigaciones han explorado la relación entre la fertilización con nutrientes esenciales —nitrógeno, fósforo y potasio— y el desarrollo inicial del arroz, considerando distintos tipos de suelo y etapas tempranas de crecimiento. Estos trabajos constituyen una base referencial relevante para el enfoque morfofisiológico planteado en la presente investigación.

Du et al. (2022) evaluaron los efectos de la interacción entre nitrógeno, fósforo y potasio sobre las características radiculares del arroz, encontrando que una fertilización balanceada en

las etapas tempranas favorece el desarrollo de raíces más largas, mayor densidad radicular y una acumulación significativa de biomasa total. Estos resultados resaltan la importancia de una nutrición equilibrada durante las fases iniciales del cultivo, particularmente en suelos con limitaciones en retención o disponibilidad de nutrientes.

De manera complementaria, Liu et al. (2024) analizaron cómo diferentes niveles de suministro de fósforo y potasio afectan la arquitectura radicular y la eficiencia de absorción en plantas de arroz cultivadas en condiciones hidropónicas. El estudio reveló una correlación positiva entre la concentración de potasio disponible y la expansión del sistema radicular durante los primeros 20 días de crecimiento, lo que subraya la necesidad de estrategias nutricionales precisas desde las fases iniciales del desarrollo fenológico.

Estos antecedentes destacan la relevancia de focalizar los estudios en las primeras etapas del desarrollo del arroz y de considerar la textura del suelo —o sus condiciones simuladas— como una variable crítica en la evaluación de la respuesta fisiológica a la fertilización.

2.3. Marco conceptual

Este estudio se enmarca en la necesidad de mejorar la eficiencia agronómica y ambiental en el cultivo de arroz (*Oryza sativa*, variedad Generosa), especialmente durante sus etapas iniciales de desarrollo (emergencia y crecimiento vegetativo temprano), considerando la influencia de la textura del suelo y la concentración de macronutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) aplicados.

1. Morfofisiología vegetal en etapas tempranas

La morfofisiología del arroz en sus primeros días define en gran parte su potencial de rendimiento. Variables como longitud de raíz, longitud foliar y biomasa son indicadores clave del estado nutricional y del desarrollo estructural de la planta.

2. Fertilización diferenciada (N, P, K)

El arroz tiene altas demandas de nutrientes, particularmente en nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), los cuales cumplen funciones críticas:

- **Nitrógeno (N):** estimula el crecimiento foliar, pero su exceso puede reducir la biomasa por estrés metabólico.
- **Fósforo (P):** esencial para el desarrollo radicular y la energía celular, aunque dosis altas provocan toxicidad y desbalances.
- **Potasio (K):** promueve la síntesis de biomasa, pero en exceso inhibe la elongación radicular.

3. Textura del suelo

Las texturas del suelo (arenosa, limosa, arcillosa) modifican radicalmente la disponibilidad y movilidad de nutrientes, y por ende la respuesta fisiológica del cultivo:

- **Arenoso:** baja retención de nutrientes, buena aireación.
- **Limoso:** balance entre retención y drenaje.
- **Arcilloso:** alta retención, pero riesgo de inmovilización de nutrientes y anoxia.

4. Interacción suelo–nutriente–planta

La eficiencia de absorción de nutrientes está condicionada por la interacción entre la textura del suelo y la dosis aplicada, generando respuestas fisiológicas que no son lineales. Esto hace necesario ajustar las prácticas de fertilización no solo a la especie, sino también al contexto edáfico específico.

5. Modelos no lineales como herramienta de análisis

El comportamiento fisiológico de las plantas frente a nutrientes sigue patrones no lineales:

- **Modelo logístico:** útil para describir respuestas sigmoideas (acumulación de biomasa o elongación hasta saturación).
- **Modelo de Bradley:** ideal para respuestas decrecientes (inhibición por exceso de nutriente).

Estos modelos permiten identificar umbrales fisiológicos que delimitan zonas de deficiencia, óptimo y toxicidad.

6. Manejo específico por sitio (SSNM)

La aplicación uniforme de fertilizantes es ineficiente en contextos diversos. El manejo específico por sitio propone ajustar la fertilización a variables como:

- Etapa fenológica del cultivo.
- Textura y propiedades del suelo.
- Respuesta fisiológica medida directamente en campo.

7. Agricultura sostenible

Este enfoque experimental promueve un modelo de agricultura más racional y sostenible, que optimiza el uso de insumos, minimiza las pérdidas por lixiviación, y reduce los impactos ambientales asociados a la sobre-fertilización. Además, es accesible a contextos rurales con infraestructura limitada.

8. Análisis de varianza (ANOVA)

El análisis de varianza (ANOVA) constituye una herramienta estadística fundamental para evaluar la significancia de los efectos principales e interacciones entre factores experimentales. En el presente estudio, el ANOVA permite determinar si existen diferencias significativas en las variables morfofisiológicas del arroz —como longitud radicular, biomasa y área foliar— al variar los niveles de nitrógeno, fósforo y potasio en diferentes tipos de suelo.

Este procedimiento proporciona una base cuantitativa para interpretar los resultados experimentales y validar la existencia de efectos diferenciales atribuibles a la textura del suelo o a la dosis de fertilización. Su empleo asegura el rigor analítico del experimento y fortalece la fiabilidad de las conclusiones sobre la respuesta fisiológica del cultivo.

CAPITULO III

3.1. Tipo y enfoque de investigación

Este estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y experimental, orientado a medir de forma directa la respuesta morfofisiológica temprana del arroz (*Oryza sativa*, variedad Generosa) frente a la aplicación diferencial de nitrógeno, fósforo y potasio en suelos de distinta textura. El diseño se estructuró para controlar las condiciones ambientales, la fuente de variación nutricional y las propiedades físicas del sustrato, lo que permitió aislar el efecto puntual de cada nutriente y evaluar respuestas medibles y comparables entre tratamientos.

El trabajo es de tipo experimental, ya que se manipularon de manera controlada los niveles de nutrientes y las texturas del sustrato, asignando cada combinación de tratamiento a unidades experimentales definidas. Esta manipulación permitió establecer relaciones causa–efecto entre las variables independientes y las respuestas fisiológicas evaluadas: longitud de raíz, longitud de hoja y biomasa total.

El enfoque es cuantitativo, dado que se trabajó con datos numéricos obtenidos mediante mediciones directas, instrumentos calibrados y procedimientos estandarizados. La interpretación de los resultados se apoyó en el uso de análisis de varianza (ANOVA) y modelos no lineales, herramientas estadísticas que permiten describir patrones de respuesta, estimar efectos principales e identificar umbrales fisiológicos asociados al suministro de nutrientes.

Además, el estudio tiene un carácter aplicado, pues busca generar información útil para mejorar la eficiencia en la fertilización de arroz en contextos rurales, especialmente en sistemas con limitaciones técnicas donde se necesitan metodologías precisas y accesibles. La elección de las etapas tempranas del cultivo responde a la necesidad de comprender cómo se

establecen, desde el inicio, las diferencias fisiológicas que condicionan la absorción de nutrientes y el potencial de crecimiento del arroz.

En conjunto, el enfoque cuantitativo, el diseño experimental controlado y la orientación aplicada del estudio permiten obtener evidencia sólida para sustentar recomendaciones sobre el manejo de nutrientes según la textura del suelo, contribuyendo a prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles.

3.2. Área y condiciones del experimento

3.2.1. Ubicación geográfica y características edafoclimáticas

El experimento se desarrolló en la Granja Agroecológica UNIMINUTO, localizada en la vereda Barcelona del municipio de Villavicencio, departamento del Meta, Colombia (coordenadas: 4.0702° N, 73.5859° W). Esta zona forma parte de los Llanos Orientales colombianos, una región agroecológica caracterizada por suelos ácidos de origen aluvial y alta pluviosidad estacional. Los suelos presentan una estructura influida por la deposición de sedimentos finos, materia orgánica de origen ganadero y residuos de cultivos, lo cual afecta tanto la dinámica de nutrientes como la retención hídrica (Gómez, 2010).

Las condiciones edafoclimáticas de la zona son representativas de ecosistemas de sabana tropical con temperaturas medias elevadas (>25 °C), alta humedad relativa y marcada estacionalidad hídrica, factores que influyen directamente en la disponibilidad y movilidad de nutrientes en el suelo.

3.2.2. Condiciones ambientales en el área experimental

Para minimizar la variabilidad ambiental y garantizar condiciones controladas durante el desarrollo del experimento, se acondicionó un área semi-abierta dentro de la granja

experimental. Esta zona fue protegida de la lluvia directa, aunque no tenía paredes laterales permitiendo el paso de luz natural y mantenía una ventilación constante, evitando acumulación de calor o humedad excesiva.

Las macetas fueron ubicadas sobre mesas elevadas, organizadas en una matriz 3×5 con distribución aleatoria de tratamientos. Este arreglo buscó homogeneizar la incidencia lumínica, facilitar el drenaje, y reducir la interferencia por microgradientes térmicos o de humedad dentro del recinto.

3.3. Diseño experimental

3.3.1. Estructura del diseño bifactorial

Se utilizó un diseño factorial de dos factores (Textura \times Concentración de nutriente) con submuestreo. Cada maceta representó una unidad experimental que recibió una única concentración del nutriente, mientras que las cinco plantas dentro de cada maceta se consideraron submuestras, empleadas para estimar el error dentro de la unidad experimental. El arreglo experimental se muestra de forma esquemática en la Figura 1.

El arreglo factorial fue de 3×5 , correspondiente a:

Factor A – Textura del sustrato (3 niveles): Arenosa, Arcillosa y Limosa.

Factor B – Concentración elemental del nutriente aplicado (5 niveles): 5 mg L^{-1} , 10 mg L^{-1} , 20 mg L^{-1} , 40 mg L^{-1} y 80 mg L^{-1} .



















Aunque las macetas se agruparon por textura sobre las mesas de cultivo, las concentraciones del nutriente se asignaron de manera independiente y sin patrón sistemático dentro de cada grupo. Debido a que el experimento se llevó a cabo en un espacio semi-abierto, sin paredes laterales y con ventilación natural constante, las condiciones ambientales fueron

homogéneas entre tratamientos, por lo tanto, el estudio mantiene las características de un diseño completamente al azar bifactorial con submuestreo, válido para el análisis estadístico de efectos principales e interacción.

Figura 1

Esquema del diseño factorial con submuestreo utilizado en el experimento. El arreglo factorial 3 × 5 corresponde a los factores Textura del sustrato (arenosa, arcillosa y limosa) y Concentración de potasio (K^+) (5, 10, 20, 40 y 80 $mg L^{-1}$).

DISEÑO FACTORIAL CON SUBMUESTREO

FACTOR B – CONCENTRACIÓN DEL NUTRIENTE (5 NIVELES)					
FACTOR A TEXTURA DEL SUSTRATO (3 NIVELES)	5 $mg L^{-1}$	10 $mg L^{-1}$	20 $mg L^{-1}$	40 $mg L^{-1}$	80 $mg L^{-1}$
 ARENOSA					
 ARCILLOSA			 UNIDAD EXPERIMENTAL (1 MACETE)	 SUBMUESTRA (1 PLANTA)	
 LIMOSA					

Arreglo Factorial 3 x 5

Cada maceta = Unidad Experimental

Cada planta = Submuestra

Nota. Cada maceta constituye una unidad experimental, y cada planta dentro de la maceta representa una submuestra, empleada para estimar la variabilidad dentro de la unidad experimental. Fuente: Diseño propio en Corel Draw®.

3.3.2. Asignación de tratamientos y distribución de macetas

Cada una de las 15 combinaciones tratamiento (3 texturas × 5 concentraciones) se asignó aleatoriamente a una maceta independiente, que actuó como unidad experimental. Las macetas se dispusieron sobre mesas elevadas, organizadas en una matriz de 2 filas por 8 columnas, sin seguir un patrón posicional regular, con el fin de minimizar posibles sesgos asociados a la orientación o gradientes microambientales.

En cada maceta se sembraron cinco núcleos independientes de plántulas, distribuidos radialmente con una separación de 5 a 7 cm entre grupos. Estos núcleos se consideraron subréplicas biológicas, empleadas para obtener mediciones morfofisiológicas repetidas dentro de la misma unidad experimental.

3.3.3. Justificación estadística del muestreo

La inclusión de subréplicas biológicas dentro de cada unidad experimental responde a una estrategia estadística orientada a controlar el error intra-tratamiento. Dado que el diseño no incluyó replicación de macetas por combinación de tratamiento (una maceta por tratamiento), el submuestreo permitió aumentar la potencia del análisis al capturar la variabilidad fisiológica entre grupos de plántulas bajo condiciones homogéneas (Hurlbert, 1984).

Este enfoque está respaldado en la literatura metodológica (Montgomery, 2020) como una alternativa válida cuando existen limitaciones de espacio o recursos, sin comprometer la validez estadística del ANOVA bifactorial, al tiempo que permite estimar el error experimental necesario para evaluar la significancia de los efectos principales y de la interacción.

3.4. Materiales y métodos

3.4.1. Preparación de sustratos y caracterización física

Composición y mezclado de texturas artificiales

Se elaboraron tres tipos de sustrato mediante mezclas artificiales controladas, con el propósito de representar condiciones edáficas contrastantes de acuerdo con su textura predominante. Los materiales empleados fueron los siguientes:

- **Arena de río lavada:** Proporciona la fracción mineral gruesa y favorece el drenaje.
- **Caolinita natural:** Aporta la fracción arcillosa fina, incrementando la capacidad de retención de agua y nutrientes.
- **Turba vegetal:** Constituye la fracción orgánica, mejorando la retención hídrica y la aireación del sustrato.

Las proporciones en peso de los componentes se determinaron conforme a principios edafológicos clásicos (Hillel & Warrick, 1998; Weil & Brady, 2017) y se ajustaron experimentalmente para reproducir suelos representativos de textura arenosa, limosa y arcillosa, según se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1

Fracciones porcentuales en peso de los materiales.

Textura	Arena (%)	Arcilla (%)	Turba (%)
Arenosa	70	20	10
Limosa	40	40	20
Arcillosa	20	70	10

Nota. Composición porcentual de arena, arcilla y turba para obtener textura arenosa, limosa y arcillosa (Weil & Brady, 2017).

La mezcla de los componentes se efectuó en estado seco, hasta obtener una distribución homogénea de las partículas. Posteriormente, los sustratos fueron hidratados y acondicionados para su utilización en macetas experimentales (Ver Figura 2).

Determinación de propiedades físicas: DA, DR, CC, PMP, humedad

La caracterización física de cada tipo de sustrato incluyó la medición de las siguientes propiedades fundamentales para el análisis de disponibilidad hídrica y comportamiento del suelo:

- **Densidad aparente (DA):** determinada mediante el método del cilindro, según Kemper & Rosenau (1986).
- **Densidad real (DR):** evaluada mediante picnometría en laboratorio.
- **Capacidad de campo (CC) y Punto de marchitez permanente (PMP):** estimados mediante el método de olla de presión, de acuerdo con Salter & Haworth (1961).
- **Contenido de humedad a saturación:** calculado gravimétricamente, luego de llevar el sustrato a saturación completa.

Estos parámetros se utilizaron para interpretar el comportamiento hídrico de cada textura y para contextualizar las diferencias observadas en las respuestas morfofisiológicas del cultivo.

Figura 2

Preparación de los sustratos y determinación de sus propiedades físicas



Nota. La figura muestra el proceso de preparación y acondicionamiento de los sustratos utilizados en el experimento. A la izquierda, homogenización manual y tamizado del material. Al

centro, el sustrato previamente secado y cribado. A la derecha, el montaje empleado para la determinación del contenido de humedad a saturación mediante el método gravimétrico. Estas actividades permitieron estandarizar las características físicas del sustrato antes de la siembra de las plántulas de arroz.

3.4.2. Cultivo del arroz

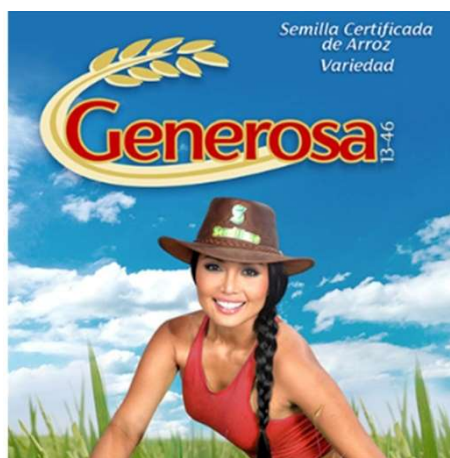
Selección de semilla y germinación

Se utilizó semilla certificada de arroz (*Oryza sativa*) variedad Generosa (Figura 3), correspondiente a un cultivar de ciclo corto, ampliamente utilizado en condiciones tropicales. La elección de esta variedad se basó en su uniformidad genética, alto porcentaje de germinación y adaptabilidad a diferentes condiciones edafoclimáticas.

Las semillas fueron sometidas a una inspección visual para descartar daños físicos y signos de deterioro. Posteriormente, se almacenaron en condiciones controladas de humedad y temperatura hasta el momento de la siembra, garantizando su viabilidad.

Figura 3

Semilla de arroz (*Oryza sativa*) variedad Generosa.



Nota. Imagen izquierda: empaque publicitario suministrado por Semillano®; imagen derecha: muestra de semilla (imagen propia, 2025).

Siembra y disposición de plántulas por maceta

En cada maceta se establecieron cinco núcleos de siembra, separados entre sí por una distancia de 5 a 7 cm. En cada núcleo se sembraron cinco semillas, las cuales fueron luego raleadas para conservar al menos tres plántulas uniformes por grupo (Figura 4a).

La disposición fue radial, con el objetivo de: reducir interferencias radiculares entre plantas, facilitar la medición individual de variables morfofisiológicas y garantizar un desarrollo homogéneo dentro de cada unidad experimental.

Esta configuración generó cinco sub-réplicas biológicas por tratamiento, las cuales fueron utilizadas como unidades de observación en los análisis estadísticos.

3.4.3. Preparación de soluciones nutritivas

Fuentes de nutrientes y composición química

Se evaluó la respuesta del arroz (*Oryza sativa* var. Generosa) a la aplicación individual de tres macronutrientes esenciales: potasio (K⁺), fósforo (P) y nitrógeno (N), aplicados por separado mediante soluciones acuosas. Se utilizaron reactivos de grado analítico (p.a.) para asegurar precisión, solubilidad y reproducibilidad experimental mostrados en la Tabla 2.

Las concentraciones aplicadas para cada nutriente fueron: 5, 10, 20, 40 y 80 mg/L, en un volumen final de 500 mL por tratamiento.

Tabla 2

Fuentes químicas de solutos: Reactivos utilizados en la preparación de las soluciones

Nutriente	Compuesto fuente	Formula molecular	Pureza/Características
Potasio	Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	99% p.a., Merck
Fósforo	Ácido fosfórico	H ₃ PO ₄	85% v/v, Sigma-Aldrich
Nitrógeno	Nitrato de calcio tetra-hidratado	Ca(NO ₃) ₂ *4H ₂ O	99% p.a., J.T. Baker

Nota. Los reactivos se seleccionaron por su elevada solubilidad en agua, estabilidad en

solución y amplio uso en experimentos de nutrición vegetal, abarcando una gama de

concentraciones desde niveles subóptimos hasta cercanos a la saturación fisiológica, según lo documentado en la literatura especializada (Epstein & Bloom, 2005).

Cálculo de soluciones madre y diluciones hijas

Para garantizar la precisión en la aplicación de nutrientes, se prepararon soluciones madre a 1600 mg/L, ajustadas según el porcentaje del ion deseado, la pureza del reactivo y, en el caso de soluciones líquidas, su densidad.

Por ejemplo, la masa requerida de fósforo elemental para preparar 1 litro de solución madre a partir de ácido fosfórico (H_3PO_4 al 85%), se calculó de la siguiente forma:

$$V = 1.000 \text{ L} \rightarrow m_P = C \cdot V = 1600 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot 1000 \text{ L} = 1600 \text{ mg} \equiv 1.6 \text{ g} \quad \text{Ecuación 1}$$

Para hallar la masa de fósforo presente en 1 mL de H_3PO_4 al 85%, se empleó la densidad del ácido fosfórico, su pureza, y la fracción másica de fósforo en la molécula:

$$m_{P,1\text{mL}} = \rho \cdot \% \text{pureza} \cdot f_P \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- ρ = densidad del reactivo en g/mL)
- %pureza = fracción de H_3PO_4 puro en el reactivo comercial
- f_P = fracción en masa de P dentro del H_3PO_4 puro

Los valores utilizados fueron:

- $\rho = 1.685 \text{ g/mL}$ (cada mililitro del ácido fosfórico comercial al 85% pesa 1.685 g).
- % pureza (0.85), de esos 1.685 g, solo el 85% corresponde a H_3PO_4 puro, el resto es agua.
- $f_P = 0.316$ (Ver *Relación* = $\frac{31 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ del fósforo}}{98 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ del ácido fosfórico}} = 0.316 \times 100 = 31.6\%$)

Ecuación 3)

La fracción másica de fósforo en el ácido fosfórico se determinó a partir de su peso molecular:

$$\text{Relación} = \frac{31 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{del fósforo}}{98 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{del ácido fosfórico}} = 0.316 \times 100 = 31.6\% \quad \text{Ecuación 3}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 2:

$$m_{P,1\text{mL}} = \left(\frac{1.685 \text{ g}}{\text{mL}} \right) \times (0.85) \times (0.316) = 458 \text{ mg/mL} \quad \text{Ecuación 4}$$

Esto indica que cada mililitro de H_3PO_4 al 85% aporta 458 mg de P. Por lo tanto, para alcanzar 1600 mg de fósforo elemental en 1 litro de solución, se requiere el siguiente volumen de reactivo:

$$V_{\text{H}_3\text{PO}_4} = \frac{m_P}{m_{P,1\text{mL}}} = \frac{1600 \text{ mg}}{458 \text{ mg/mL}} = 3.49 \text{ mL de H}_3\text{PO}_4 \quad \text{Ecuación 5}$$

Las diluciones se prepararon utilizando material volumétrico de alta precisión, incluyendo matraces aforados clase A y pipetas volumétricas, con el fin de garantizar la exactitud en las concentraciones de las soluciones nutritivas.

La validación fisicoquímica de las soluciones —en términos de conductividad eléctrica (EC) y sólidos disueltos totales (TDS)— se efectuó mediante mediciones directas con un medidor multiparámetro portátil Hanna Instruments HI99300, previamente calibrado conforme a las especificaciones del fabricante. La conductividad eléctrica se expresó en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S/cm}$) y los sólidos disueltos totales en partes por millón (ppm).

Con el propósito de verificar la precisión de las concentraciones objetivo en las soluciones nutritivas, se elaboraron curvas de calibración específicas de concentración frente a EC y TDS para cada nutriente (véase Anexo 1). Los procedimientos empleados para la

determinación de EC y TDS siguieron las directrices establecidas por la American Public Health Association, American Water Works Association y Water Environment Federation (2005).

3.4.4. Aplicación de tratamientos y recolección de lixiviados

Durante el periodo experimental, los tratamientos fueron aplicados una vez al día en dos fracciones de 250 mL, con el propósito de asegurar una infiltración uniforme en el sustrato y minimizar posibles escurrimientos superficiales. La aplicación se efectuó de manera controlada, lenta y directa sobre la superficie del sustrato, garantizando la homogeneidad del proceso.

Los lixiviados generados se recolectaron mediante el orificio de drenaje de cada maceta, utilizando bolsas estériles Whirl-Pak® de 100 mL, diseñadas para la toma de muestras líquidas. En dichas muestras se determinaron las siguientes variables: volumen total recuperado, conductividad eléctrica (EC), concentración de sólidos disueltos totales (TDS) y los tiempos de inicio y finalización del drenaje, con el fin de estimar la velocidad de infiltración.

El lixiviado se consideró una muestra compuesta representativa del comportamiento del tratamiento aplicado sobre las cinco subunidades de siembra, conforme al enfoque experimental propuesto por McGechan et al. (2002).

3.5. Variables Medidas

Las variables analizadas correspondieron a indicadores morfofisiológicos asociados al crecimiento temprano de plántulas de arroz (*Oryza sativa*), evaluadas de manera directa durante el desarrollo experimental. Estas incluyeron la longitud de raíz (cm), definida como la distancia comprendida entre la base del tallo y el ápice de la raíz principal; la longitud de hoja (cm), determinada como la longitud máxima de la hoja más desarrollada de cada plántula; el peso fresco total (g), correspondiente a la biomasa total obtenida inmediatamente después de

la cosecha; y el peso seco de la biomasa total (g), determinado tras el secado en horno hasta alcanzar peso constante.

La medición de estas variables permitió caracterizar la respuesta morfofisiológica de las plántulas de arroz frente a los diferentes tratamientos de fertilización y las variaciones en la textura del sustrato, evidenciando el efecto del suministro de nutrientes sobre el crecimiento y la acumulación de biomasa durante las etapas iniciales del desarrollo vegetal.

3.5.1. Longitud de la raíz

Momento de medición

Las mediciones morfofisiológicas se realizaron 15 días después de la siembra, o cuando las plántulas alcanzaron una longitud foliar aproximada de 10 cm, estas mediciones se realizaron en laboratorio. Este momento corresponde a las etapas de emergencia y crecimiento vegetativo temprano del arroz, una fase adecuada para detectar diferencias iniciales atribuibles a la textura del sustrato y a la concentración de nutrientes aplicados (Figura 4). Cabe señalar que el estudio no abarcó fases reproductivas ni de madurez, por lo que los resultados se limitan al desarrollo inicial del cultivo y no deben extrapolarse directamente al rendimiento en grano.

Figura 4

Proceso experimental: crecimiento en bandejas, extracción de plántulas y preparación de raíces para análisis. (a) Área de establecimiento de las plántulas de arroz; (b) muestra de plántulas extraídas para medición de variables morfológicas; (c) lavado de las muestras previo a la toma de datos.



Nota. Todas las imágenes corresponden a registros propios tomados durante el experimento (Imagen propia, 2024).

Procedimiento de medición

Las evaluaciones se realizaron de forma individual sobre cada uno de los cinco grupos de plántulas por maceta, generando cinco sub-réplicas biológicas por tratamiento (Figura 4b y c). Las mediciones se efectuaron con un calibrador Vernier (Pie de Rey) digital con una sensibilidad de ± 0.01 cm y siguiendo protocolos estándar de fisiología vegetal para asegurar consistencia y comparabilidad (Figura 5).

En el caso del peso seco, las muestras fueron previamente pesadas en fresco, y luego secadas en un horno de circulación forzada a 105°C durante 24 horas. Una vez alcanzado peso constante, se registró el valor final de biomasa seca.

Figura 5

Procesamiento de plántulas de arroz (*Oryza sativa*) para medición morfológica: (a) medición de la longitud radicular tras el lavado de las muestras; (b) medición de la longitud foliar durante el análisis en laboratorio; (c) plántulas envueltas en papel absorbente para su secado en horno a temperatura controlada (Imagen propia, 2024).



3.5.2. Biomasa Total

Peso fresco total

El peso fresco total (g) fue medido inmediatamente después de la cosecha, tomando las plántulas completas de cada subgrupo dentro de la maceta. Cada uno de los cinco núcleos por tratamiento fue evaluado por separado, utilizando una balanza analítica de alta precisión ($\pm 0,001$ g).

Se procuró realizar el pesaje en un lapso no mayor a 10 minutos tras la recolección, para evitar pérdida de agua por evaporación que pudiera sesgar el valor del peso fresco.

Secado en horno y obtención de peso seco

Luego del pesaje en fresco, el material vegetal fue separado en biomasa total, colocado en bolsas de papel identificadas, y llevado a secado en horno de circulación forzada a 105°C durante 24 horas.

Tras este periodo, se verificó que el peso fuera constante mediante pesajes sucesivos. El valor final se registró como peso seco de biomasa incluyendo raíz (g), representando la fracción estructural acumulada durante el desarrollo vegetativo.

3.5.3. Longitud de hoja

Procedimiento de medición

La longitud de hoja fue medida en cada uno de los cinco núcleos de plántulas por maceta, considerando la hoja más larga y completamente expandida de cada grupo como unidad de análisis.

Se utilizó un calibrador Vernier (Pie de Rey) digital digital con una sensibilidad de ± 0.01 cm y se midió desde la base de inserción foliar hasta el ápice de la hoja, manteniendo la hoja en posición recta sin aplicar tensión.

Las mediciones fueron realizadas con instrumentos calibrados y bajo condiciones estandarizadas. Cada núcleo actuó como una subréplica fisiológica, generando cinco datos independientes por tratamiento. Para evitar errores sistemáticos, el procedimiento fue ejecutado por una única encargada por vez, siguiendo un protocolo preestablecido, tal como recomiendan las guías para la estandarización de mediciones morfológicas en plantas (Cornelissen et al., 2003).

Condiciones estándar para la medición

Las mediciones se llevaron a cabo en un área cerrada del laboratorio, bajo condiciones ambientales controladas, con el objetivo de garantizar la precisión y reproducibilidad de la evaluación morfofisiológica. La temperatura ambiente se mantuvo entre 20 y 25 °C, con una humedad relativa inferior al 60 %. La iluminación fue difusa y constante, evitando la presencia de sombras directas sobre las muestras.

Para las determinaciones métricas se utilizó una regla metálica calibrada con una precisión de $\pm 0,5$ mm. Estas condiciones experimentales aseguraron la consistencia entre mediciones y minimizaron la variabilidad atribuible tanto al entorno físico como al instrumento empleado. Los datos experimentales obtenidos se incluyen en el Anexo 2.

3.6. Análisis Estadístico

3.6.1. ANOVA bifactorial con submuestreo

Se utilizó un modelo ANOVA bifactorial con submuestreo, bajo un diseño completamente al azar. El objetivo fue evaluar los efectos independientes y combinados de dos factores:

Factor A: Textura del sustrato (arenosa, limosa, arcillosa)

Factor B: Concentración del nutriente aplicado (5, 10, 20, 40, 80 mg/L)

Cada combinación (3×5) fue aplicada a una maceta única, con cinco subréplicas biológicas (núcleos de plántulas). El modelo estadístico aplicado se muestra en la

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \varepsilon_{ijk} + d_{ijkm} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \varepsilon_{ijk} + d_{ijkm} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

Y_{ijk} = variable morfofisiológica observada (valor observado de biomasa, raíz o hoja)

μ = media general

A_i = efecto del tipo de suelo ($i = 1, 2, 3$)

B_j = efecto de la concentración ($j = 1, 2, 3, 4, 5$)

$(AB)_{ij}$ = interacción suelo × concentración

ε_{ijk} = error experimental (medido entre subréplicas, $k = 1, 2, \dots, 5$)

d_{ijkm} = variación dentro de macetas (submuestreo: plantas).

Se realizaron ANOVA independientes para biomasa, longitud de raíz y longitud de hoja, descomponiendo la varianza total en fuentes atribuibles a los factores, su interacción y el error.

3.6.2. Pruebas post hoc (Tukey HSD)

Tras detectar efectos significativos en el ANOVA, se realizaron pruebas de comparaciones múltiples Tukey HSD ($\alpha = 0,05$) para identificar diferencias entre niveles de concentración y texturas.

Este análisis permitió determinar qué tratamientos específicos generaron respuestas significativamente distintas en las variables morfofisiológicas evaluadas.

3.6.3. Estimación de varianza explicada

Se estimó el tamaño del efecto (η^2) para cada factor experimental y para su interacción, con el propósito de expresar el porcentaje de la varianza total atribuible a la textura del sustrato, a la concentración del nutriente y a la interacción entre ambos factores.

Este análisis permitió establecer la jerarquía de influencia relativa de cada componente sobre las variables morfofisiológicas evaluadas, contribuyendo a una interpretación más precisa y biológicamente fundamentada de los resultados obtenidos. Los resultados del análisis de varianza y las comparaciones de medias (Tukey HSD) se incluyen en el Anexo 3 y las fórmulas detalladas para el cálculo de la suma de cuadrados, grados de libertad, cuadrados medios y estadísticos F se presentan en el Anexo 4.

3.6.4. Ajuste de modelos no lineales

Para describir cuantitativamente las respuestas de biomasa y longitud frente a las dosis acumuladas de nutrientes, se ajustaron modelos no lineales tipo dosis–respuesta, de manera independiente para cada textura.

- **Modelo de Bradley (longitud hoja)**

En casos donde la respuesta mostró un patrón decreciente abrupto, se ajustó el modelo empírico de Bradley mostrado en la $y = a \cdot \ln(-b \cdot \ln(x))$ Ecuación 7

$$y = a \cdot \ln(-b \cdot \ln(x)) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

y = Valor de la variable de respuesta fisiológica (por ejemplo, longitud de hoja en cm).

x

a

b

Este

- **Modelo logístico (biomasa, longitud raíz)**

En los casos donde se observó una curva sigmoidea (crecimiento inicial seguido de estabilización), se aplicó el modelo logístico de cinco parámetros mostrado en la

$$y = A_1 + \frac{A_2 - A_1}{1 + 10^{(\text{Log}x_0 - x) \cdot p}} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$y = A_1 + \frac{A_2 - A_1}{1 + 10^{(\text{Log}x_0 - x) \cdot p}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

y = respuesta fisiológica (biomasa seca promedio o longitud),

x = masa acumulada de nutriente aplicada (mg/maceta),

A₁ = respuesta mínima (valor de la variable sin aporte del nutriente),

A₂ = respuesta máxima (valor de saturación),

Log x₀ = logaritmo del valor de inflexión (dosis a la que se alcanza el 50 % de la respuesta máxima),

p = pendiente del ajuste (define la sensibilidad del sistema a los cambios en dosis).

3.6.5. Evaluación de R^2 , parámetros y coherencia morfofisiológica

Los modelos fueron ajustados mediante regresión no lineal utilizando el algoritmo de Levenberg–Marquardt, implementado en las herramientas de análisis estadístico del software OriginLab (versión académica 2023, OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA). Se evaluó el coeficiente de determinación ajustado (R^2) como indicador de la calidad del ajuste, la significancia estadística de los parámetros estimados y la coherencia fisiológica de los modelos en función de la textura del sustrato y de la respuesta esperada del cultivo.

La validación cruzada con los datos experimentales corroboró que los modelos describían de manera adecuada la dinámica de absorción y la respuesta morfofisiológica del cultivo frente a las diferentes condiciones de textura y concentración de nutrientes, asegurando la consistencia entre la modelación estadística y los procesos biológicos subyacentes.

CAPÍTULO IV

4.1. Respuesta a potasio (K^+)

Se evaluaron dos variables de respuesta: longitud de la hoja (cm) y biomasa total (g) en función de la concentración de potasio en solución (5, 10, 20, 40 y 80 mg L⁻¹) y la textura del suelo (arenosa, arcillosa y limosa).

4.1.1. Longitud de la raíz

a. Análisis descriptivo

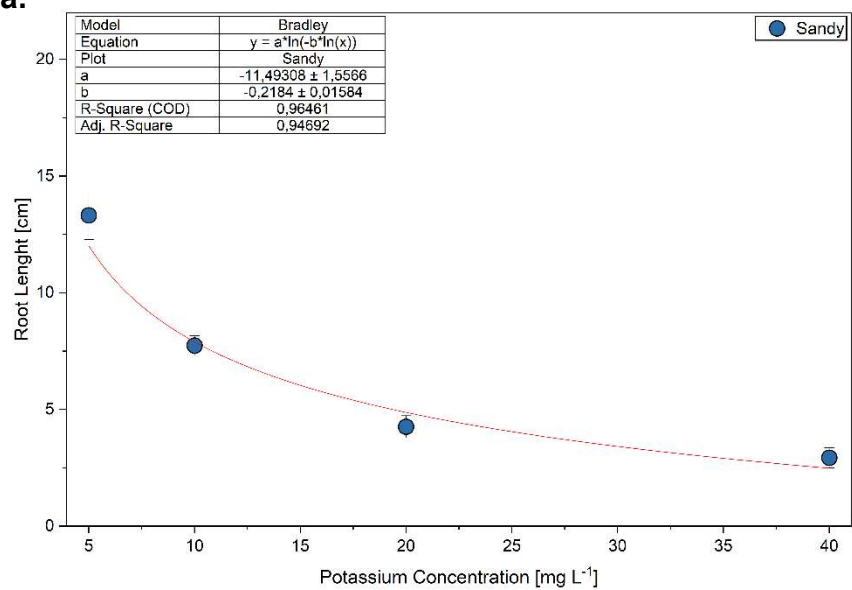
La longitud radicular presentó una disminución progresiva conforme aumentó la concentración de potasio, independientemente de la textura del suelo (Figura 6). A concentraciones bajas (5–10 mg L⁻¹), se observó una reducción abrupta, con longitudes promedio de 13,32 ± 2,09 cm en el sustrato arenoso, 11,62 ± 0,77 cm en el arcilloso y 8,46 ± 1,61 cm en el limoso. En concentraciones intermedias (20 mg L⁻¹), las raíces se redujeron a valores aproximados de 2 a 4 cm, dependiendo de la textura del sustrato. Finalmente, en la dosis más elevada (40 mg L⁻¹), las raíces alcanzaron las longitudes mínimas registradas, entre 0,5 y 1,5 cm en los sustratos arcilloso y limoso, y 1,9 cm en el arenoso.

Estos resultados evidencian un efecto inhibitorio del exceso de potasio sobre la elongación radicular, con una manifestación más pronunciada en los sustratos de textura fina, particularmente en los de tipo arcilloso y limoso.

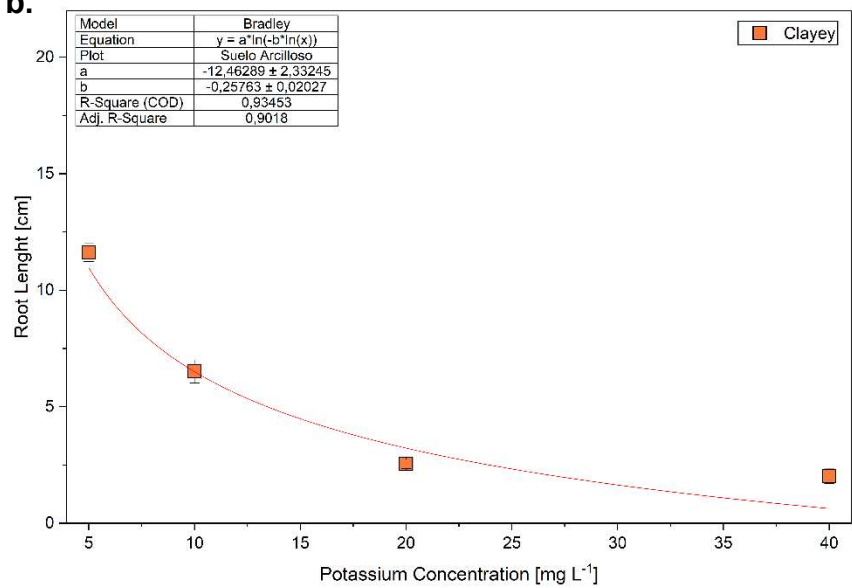
Figura 6

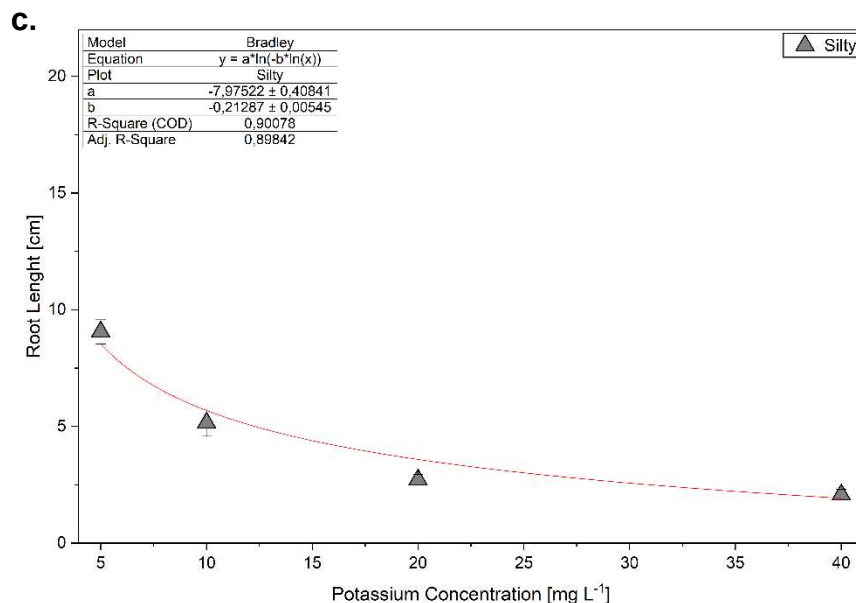
Longitud radicular de plántulas de arroz en función de la concentración de potasio suministrado en solución acuosa, para tres texturas: (a) arenosa, (b) arcillosa y (c) limosa.

a.



b.





Nota. La Figura 6 muestra la longitud radical de plántulas de arroz (*Oryza sativa*) en función de la concentración de potasio (K^+) suministrado en solución acuosa, bajo tres tipos de textura del sustrato. Las curvas de tendencia y los gráficos fueron generados mediante análisis estadístico en el software OriginLab (versión académica 2023, OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA).

En todos los casos se observa una disminución progresiva de la longitud de raíz conforme aumenta la concentración de K^+ , evidenciando una respuesta negativa del crecimiento radical al incremento del nutriente, con variaciones en la magnitud del efecto según la textura del suelo.

b. Análisis de varianza (ANOVA bifactorial con submuestreo)

El análisis de varianza (ANOVA) reveló efectos altamente significativos tanto de la concentración de potasio (factor B) como de la textura del suelo (factor A) sobre la longitud radical ($p < 0,0001$). Los resultados obtenidos fueron los siguientes: para el factor A (textura),

F = 30,20; SC = 57,10; gl = 2; para el factor B (concentración), F = 353,84; SC = 1003,67; gl = 4; y para el modelo completo, F = 242,59; $p < 0,0001$, con un error residual de 95,5 (Ver Anexo).

El factor correspondiente a la concentración de potasio explicó la mayor proporción de la variabilidad total observada, lo que confirma su papel determinante en la modulación del crecimiento radicular bajo las condiciones experimentales evaluadas.

c. Comparaciones de medias (Prueba de Tukey, $\alpha = 0,05$):

Las comparaciones de medias realizadas mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de potasio ($p < 0,0001$). El mayor crecimiento radicular se registró a una concentración de 5 mg L^{-1} (Grupo A), disminuyendo de manera progresiva hasta alcanzar los valores mínimos a 40 mg L^{-1} (Grupo D).

d. Modelos no-lineales:

Para la descripción de las tendencias observadas, se aplicó el modelo de Bradley (según lo descrito en la sección 2.9.4.1), el cual representó de manera adecuada la relación decreciente entre la concentración de potasio y la longitud radicular. Los parámetros estimados para cada textura del sustrato fueron los siguientes: arenoso ($a = -12,45 \pm 0,85$; $b = -0,2224 \pm 0,0091$; $R^2 = 0,9067$; R^2 ajustado = 0,9025), arcilloso ($a = -11,15 \pm 0,54$; $b = -0,2321 \pm 0,0052$; $R^2 = 0,9252$; R^2 ajustado = 0,9230) y limoso ($a = -7,98 \pm 0,41$; $b = -0,2129 \pm 0,0055$; $R^2 = 0,9008$; R^2 ajustado = 0,8984).

El modelo describió con precisión la marcada reducción inicial en la longitud radicular, seguida de una fase de estabilización en valores mínimos. Los ajustes de mayor calidad se

obtuvieron para el sustrato arcilloso (R^2 ajustado = 0,92), seguido del arenoso (0,90) y el limoso (0,89), lo que evidencia la solidez y capacidad del modelo de Bradley para interpretar adecuadamente respuestas morfofisiológicas de naturaleza no lineal.

En relación con la textura del suelo, el sustrato arenoso presentó la mayor elongación radicular, con una longitud promedio de $6,21 \pm 4,10$ cm (Grupo A), seguido por el sustrato arcilloso ($4,00 \pm 3,42$ cm) y el limoso ($3,29 \pm 2,38$ cm). Las diferencias entre las tres texturas resultaron estadísticamente significativas, lo que confirma la influencia de la estructura del sustrato sobre el desarrollo radicular.

Este patrón coincide con lo reportado por Mostofa et al. (2022), quienes destacan que concentraciones elevadas de potasio pueden inducir una redistribución hormonal desfavorable, particularmente en el balance de auxinas y citoquininas, lo cual limita la elongación radicular. A nivel fisiológico, el exceso de K^+ puede causar desbalances osmóticos y alterar la expansión celular, afectando negativamente la arquitectura de la raíz en etapas tempranas. Además, se ha descrito que transportadores como KUP9 y TRH1 modulan la distribución de auxinas en el ápice radical bajo condiciones de alto K^+ , reforzando el vínculo entre el estado nutricional potásico y el desarrollo radicular.

Si bien este estudio no evalúa el rendimiento final del cultivo, los resultados respaldan que un suministro equilibrado de K^+ es clave para un establecimiento radicular óptimo en condiciones controladas.

La textura del suelo moduló la respuesta radicular. En suelos arenosos, el arroz mantuvo raíces más largas en todos los niveles de K^+ evaluados, probablemente debido a la menor retención de sales y mejores condiciones de aireación, lo cual favorece el crecimiento

radical. Este comportamiento es consistente con lo indicado por Sack & Scoffoni (2013), quienes subrayan que suelos con alta porosidad y rápida percolación reducen la acumulación de iones en la rizosfera, atenuando el riesgo de estrés osmótico. Por el contrario, en suelos arcillosos y limosos, el exceso de potasio exacerbó la inhibición del crecimiento radicular, posiblemente por su elevada capacidad de intercambio catiónico (CIC) y retención de humedad, lo que intensifica los desbalances osmóticos. Según Gupta & Huang (2014), estos suelos pueden acumular mayores concentraciones de cationes como K^+ en la zona radical, limitando la expansión celular y alterando el equilibrio hídrico, especialmente en condiciones de alta fertilización o riego reducido.

4.1.2. Biomasa Total

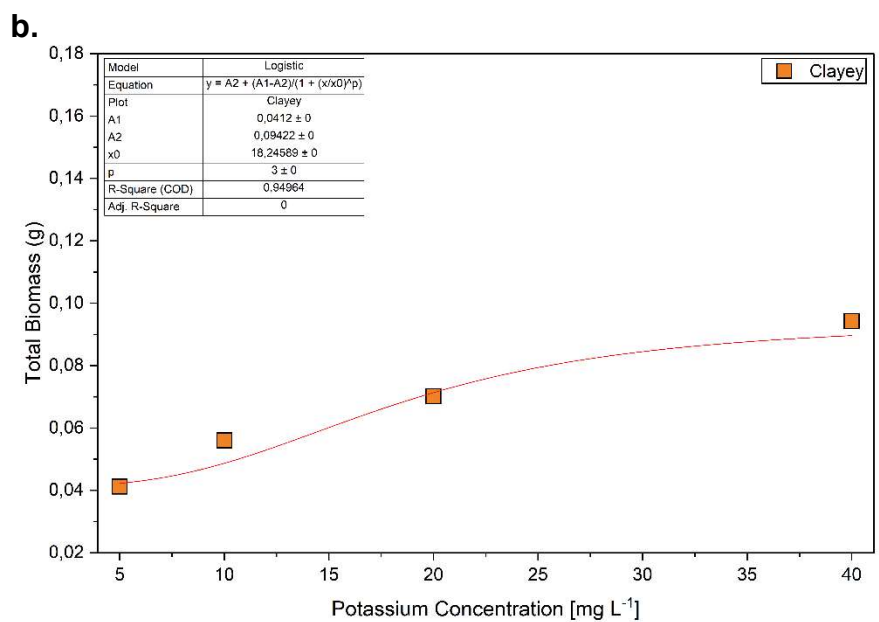
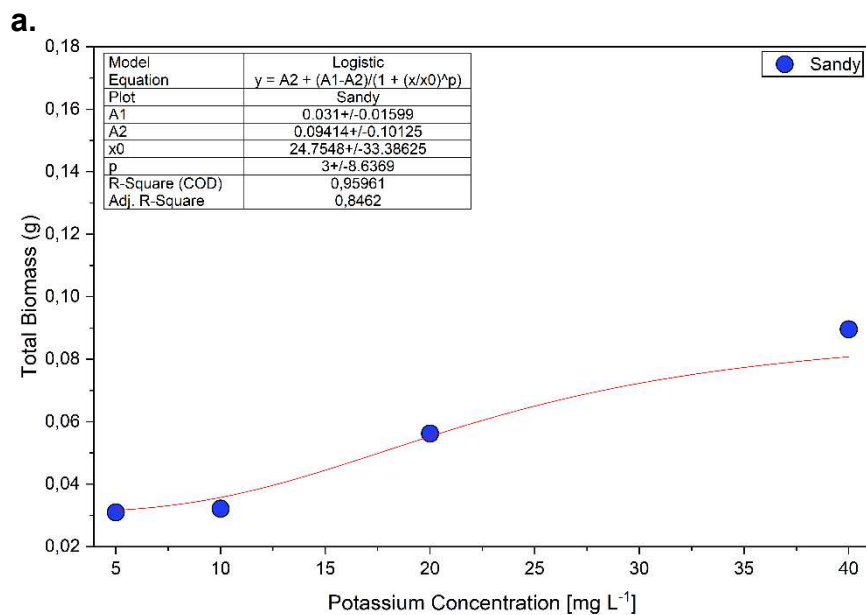
a. Análisis descriptivo

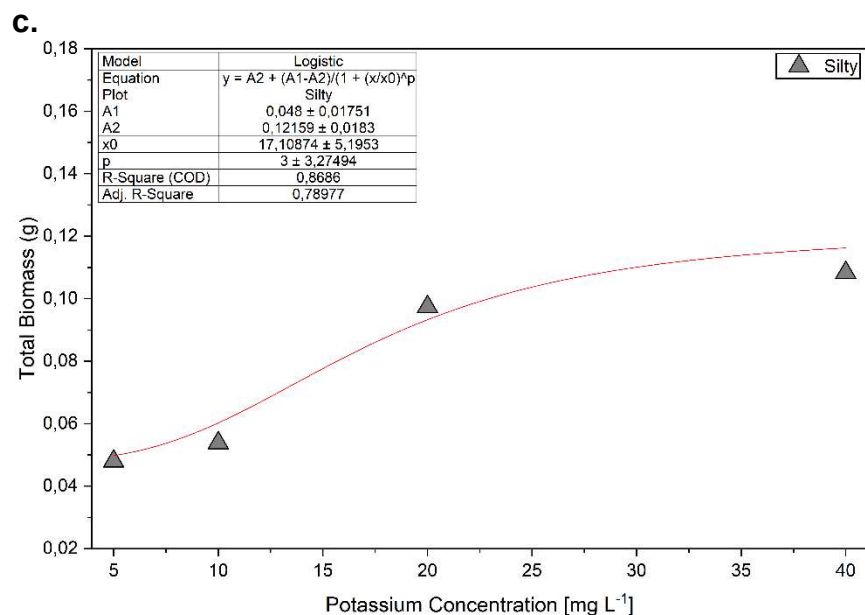
En contraste con el comportamiento observado en la longitud radicular, la biomasa total presentó un incremento progresivo con tendencia sigmoidea conforme aumentó la concentración de potasio (Figura 7). Los valores más bajos se registraron a 5 mg L^{-1} (aproximadamente $0,03\text{--}0,04 \text{ g}$), mostrando incrementos consistentes hasta alcanzar valores de alrededor de $0,08\text{--}0,10 \text{ g}$ a una concentración de 40 mg L^{-1} .

El orden de acumulación promedio de biomasa fue: sustrato limoso ($0,094 \pm 0,03 \text{ g}$) > arcilloso ($0,081 \pm 0,02 \text{ g}$) > arenoso ($0,064 \pm 0,03 \text{ g}$). Este patrón sugiere una influencia positiva del potasio sobre la síntesis de biomasa, efecto que se ve potenciado en sustratos con mayor capacidad de retención hídrica y disponibilidad de nutrientes.

Figura 7

Biomasa de plántulas de arroz en función de la concentración de potasio suministrado en solución acuosa, para tres texturas (a) arenosa, (b) arcillosa y (c) limosa





Nota. La Figura 7 muestra la biomasa de plántulas de arroz (*Oryza sativa*) en función de la concentración de potasio (K⁺) suministrado en solución acuosa, bajo tres tipos de textura del sustrato. Los datos utilizados son originales, obtenidos en el presente estudio, y las curvas de ajuste y gráficos fueron generados mediante análisis estadístico en el software software OriginLab (versión académica 2023, OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA).

En todos los casos, se observa una tendencia creciente de la biomasa con el aumento de la concentración de K⁺, aunque con diferencias en la magnitud de respuesta según la textura del suelo, lo que indica una variación en la eficiencia de absorción y aprovechamiento del nutriente.

b. Análisis de varianza (ANOVA bifactorial con submuestreo)

El análisis de varianza (ANOVA) confirmó efectos altamente significativos de ambos factores sobre la biomasa total ($p < 0,0001$). Los resultados indicaron valores de $F = 15,83$ para el factor A (textura), $F = 67,36$ para el factor B (concentración de potasio) y un valor global de $F = 51,06$ para el modelo completo ($p < 0,0001$), con un error residual de $5,97 \times 10^{-5}$.

El factor correspondiente a la concentración de potasio explicó la mayor proporción de la variabilidad observada en la biomasa total, aunque la textura del sustrato ejerció un efecto modulador sobre la magnitud de la respuesta, evidenciando la interacción entre las propiedades físicas del suelo y la disponibilidad del nutriente en el desarrollo del cultivo.

c. Comparaciones de medias (Prueba de Tukey, $\alpha = 0,05$):

El análisis de comparaciones múltiples, realizado mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$), evidenció diferencias significativas tanto entre las texturas del suelo como entre los niveles de concentración de potasio. En lo referente a las texturas, el sustrato limoso presentó la mayor acumulación de biomasa y se clasificó dentro del Grupo A, seguido del sustrato arcilloso (Grupo B), que mostró valores intermedios, y del sustrato arenoso (Grupo C), con las menores acumulaciones registradas. Las diferencias entre los tres tipos de textura fueron estadísticamente significativas ($p < 0,001$), lo que demuestra la marcada influencia del tipo de suelo en la respuesta fisiológica del cultivo.

En relación con las concentraciones de potasio (K^+), se observó un incremento progresivo y estadísticamente significativo en la biomasa total, desde $0,040 \pm 0,01$ g a 5 mg L^{-1} hasta $0,099 \pm 0,01$ g a 40 mg L^{-1} . Cada nivel evaluado presentó diferencias significativas respecto a los demás ($p < 0,001$), lo que confirma la existencia de un efecto dosis–respuesta positivo dentro del rango experimental estudiado, asociado a la mayor disponibilidad de potasio en el medio de crecimiento.

d. Modelos no-lineales

Se ajustaron modelos logísticos (según lo descrito en la sección 2.9.4.2), los cuales representaron adecuadamente la respuesta sigmoidea observada en la acumulación de

biomasa. Los parámetros estimados para cada tipo de sustrato fueron los siguientes: arenoso ($A_1 = 0,031 \pm 0,016$; $A_2 = 0,094 \pm 0,101$; $x_0 = 24,75 \pm 33,4$; $p = 3 \pm 8,64$; R^2 ajustado = 0,846), arcilloso ($A_1 = 0,041 \pm 0,014$; $A_2 = 0,105 \pm 0,070$; $x_0 = 23,73 \pm 21,7$; $p = 3 \pm 6,65$; R^2 ajustado = 0,791) y limoso ($A_1 = 0,048 \pm 0,018$; $A_2 = 0,122 \pm 0,018$; $x_0 = 17,11 \pm 5,2$; $p = 3 \pm 3,27$; R^2 ajustado = 0,790).

Los modelos lograron captar con precisión la fase inicial de aceleración del crecimiento y el punto de inflexión ubicado entre 25 y 40 mg L⁻¹, correspondiente a la transición hacia la fase de saturación. El mejor ajuste se obtuvo en el sustrato arenoso (R^2 ajustado = 0,85), lo que confirma la idoneidad del modelo logístico para describir la dinámica no lineal del crecimiento biomásico en respuesta a la concentración de potasio.

En relación con las concentraciones de potasio (K⁺), se observó un incremento progresivo y estadísticamente significativo en la biomasa total, desde $0,040 \pm 0,01$ g a 5 mg L⁻¹ hasta $0,099 \pm 0,01$ g a 40 mg L⁻¹. Cada nivel evaluado presentó diferencias significativas respecto a los demás ($p < 0,001$), lo que confirma la existencia de un efecto dosis–respuesta positivo dentro del rango experimental estudiado, asociado a la mayor disponibilidad de potasio en el medio de crecimiento.

La acumulación de biomasa total respondió significativamente a la concentración de K⁺, siguiendo un patrón claro de dosis–respuesta. Desde 5 mg L⁻¹ ($0,040 \pm 0,01$ g) hasta 40 mg L⁻¹ ($0,099 \pm 0,01$ g), se observó un incremento progresivo y significativo en todos los niveles evaluados ($p < 0,001$). Este comportamiento coincide con lo reportado por Mohd Zain & Ismail (2016), quienes documentaron aumentos en la biomasa total de arroz con dosis crecientes de potasio hasta alcanzar un umbral crítico, a partir del cual los beneficios se estabilizan o

disminuyen. Además, la textura del suelo también influyó en la acumulación de biomasa: el suelo limoso presentó los valores más altos (Grupo A), seguido del arcilloso (Grupo B) y el arenoso (Grupo C), con diferencias significativas entre ellos ($p < 0,001$). Esta tendencia está respaldada por el metaanálisis de Sun et al. (2022), que demuestra que las texturas finas (como limo y arcilla) promueven una mayor retención de nutrientes y humedad, lo cual mejora la fertilidad y favorece la acumulación de biomasa vegetal, en comparación con suelos más gruesos y menos retentivos.

El umbral fisiológico ($\sim 25\text{--}40 \text{ mg L}^{-1}$) identificado por los modelos logísticos es clave para diseñar recomendaciones de fertilización: dosis superiores no aportan beneficios adicionales en biomasa y pueden afectar negativamente la elongación radicular.

4.2. Respuesta a fósforo

Se evaluaron dos variables de respuesta: longitud de la hoja (cm) y biomasa total (g) en función de la concentración de fósforo en solución (5, 10, 20, 40 y 80 mg L^{-1}) y la textura del suelo (arenosa, arcillosa y limosa).

4.2.1. Longitud de la hoja

a. Análisis descriptivo

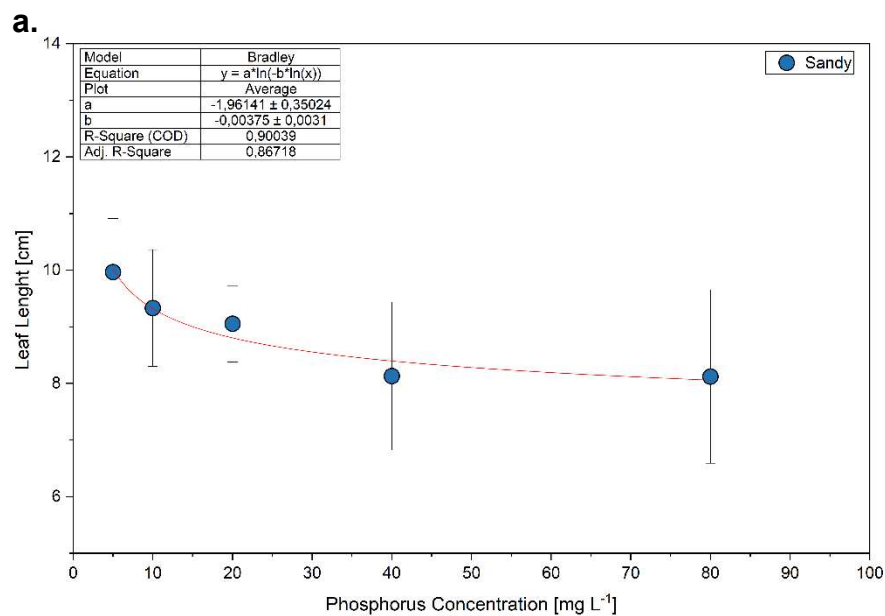
La longitud foliar de las plántulas de arroz presentó una tendencia decreciente a medida que aumentó la concentración de fósforo en la solución nutritiva (Figura 8). A una concentración de 5 mg L^{-1} se registraron los valores más elevados, con una longitud promedio de $9,08 \pm 0,47 \text{ cm}$, destacando las plántulas cultivadas en suelo arenoso ($\sim 10 \text{ cm}$) frente a las de suelo limoso ($\sim 8 \text{ cm}$). Entre 10 y 20 mg L^{-1} , la longitud foliar disminuyó de manera pronunciada, con una reducción promedio cercana a 1,5 cm respecto al nivel inicial. A 40 mg L^{-1} , los valores se estabilizaron en torno a 7,5–8 cm, sin descensos abruptos adicionales,

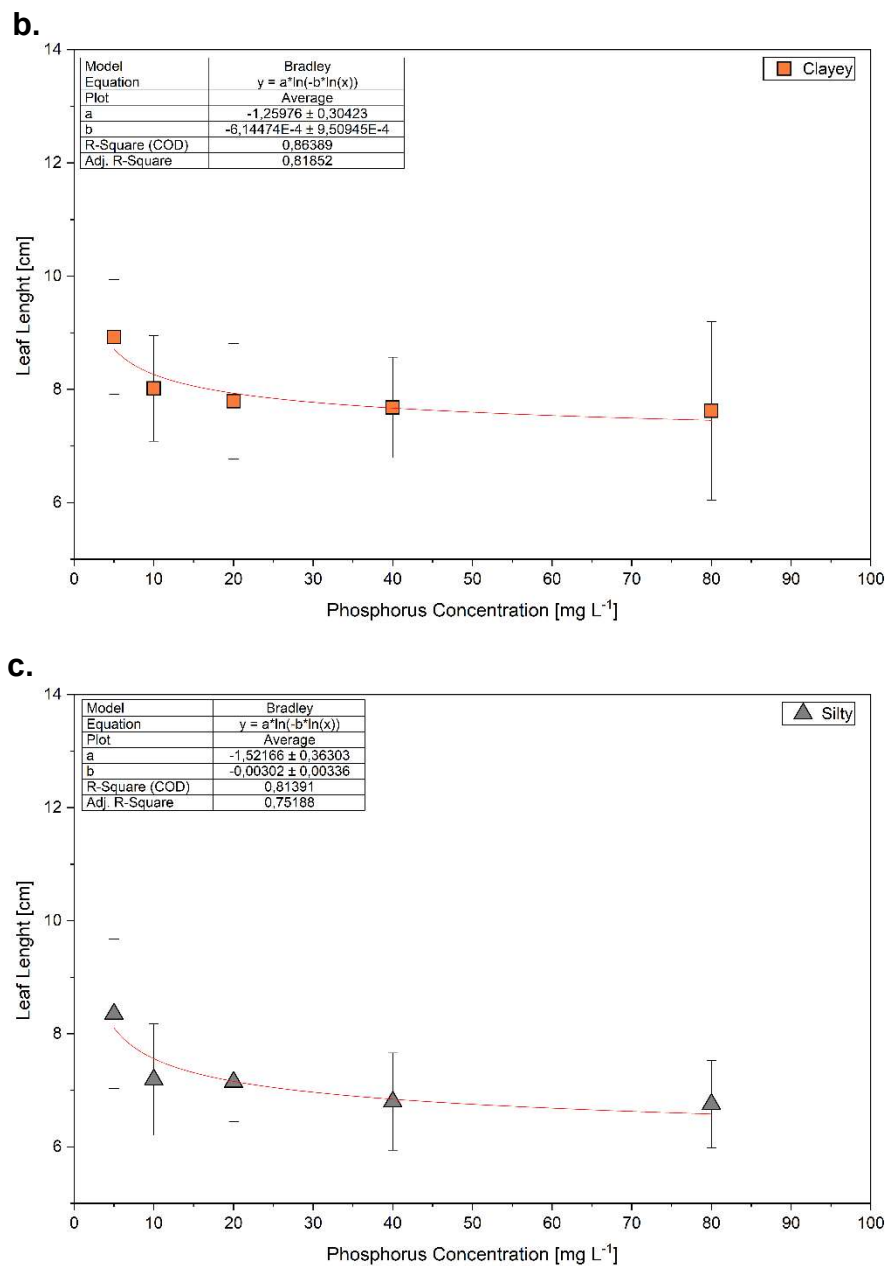
mientras que a 80 mg L^{-1} se mantuvo la tendencia descendente, alcanzándose valores mínimos de $7,49 \pm 0,69 \text{ cm}$, equivalentes a una reducción aproximada del 20 % respecto a la dosis más baja.

En cuanto al efecto de la textura del suelo, se observó una jerarquía claramente definida: sustrato arenoso ($8,77 \pm 0,80 \text{ cm}$) > arcilloso ($7,98 \pm 0,49 \text{ cm}$) > limoso ($7,29 \pm 0,59 \text{ cm}$). Este patrón indica que los suelos más aireados y con menor capacidad de adsorción de fósforo, como los arenosos, favorecen una mayor elongación foliar. En contraste, los suelos limosos, caracterizados por una mayor retención y fijación del fósforo, limitan su disponibilidad inmediata y, por ende, restringen el crecimiento foliar.

Figura 8

Longitud foliar de plántulas de arroz en función de la concentración de fósforo suministrado en solución acuosa en tres texturas de suelo: (a) arenosa, (b) arcillosa y (c) limosa.





Nota. La Figura 8 muestra la longitud foliar de plántulas de arroz (*Oryza sativa*) en función de la concentración de fósforo (P) suministrado en solución acuosa, bajo tres tipos de textura del sustrato. Los datos utilizados son originales, obtenidos en el presente estudio, y las curvas de ajuste y gráficos fueron generados mediante análisis estadístico en el software software OriginLab (versión académica 2023, OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA).

En general, se observa una tendencia decreciente de la longitud foliar con el incremento de la concentración de fósforo, indicando una respuesta negativa del crecimiento aéreo ante niveles elevados del nutriente.

b. Análisis de varianza (ANOVA bifactorial con submuestreo)

El análisis de varianza (ANOVA) evidenció efectos altamente significativos de la concentración de fósforo y de la textura del suelo sobre la longitud foliar ($p < 0,0001$). Los resultados mostraron que el factor concentración (B) presentó un valor de $F = 10,25$, indicando un efecto moderado pero consistente, en el que las dosis crecientes de fósforo redujeron progresivamente el desarrollo foliar. Por su parte, el factor textura (A) registró un valor de $F = 25,96$, con una influencia relativamente mayor, lo que resalta el papel determinante del sustrato en la regulación de la disponibilidad de fósforo. El modelo completo alcanzó un valor de $F = 16,64$ ($p < 0,0001$), con un error residual de 0,10 (Ver Anexo).

En conjunto, estos resultados indican que, si bien el fósforo ejerció un efecto inhibitorio general sobre la elongación foliar, la textura del suelo moduló de manera significativa la magnitud de dicha respuesta, reflejando la interacción entre las propiedades físico-químicas del sustrato y la dinámica de disponibilidad del nutriente.

c. Comparaciones de medias (Prueba de Tukey, $\alpha = 0,05$):

En relación con las concentraciones de fósforo, el tratamiento con 5 mg L^{-1} presentó la mayor longitud foliar ($9,08 \pm 0,47 \text{ cm}$, Grupo A), mientras que la dosis más alta, 80 mg L^{-1} , mostró una reducción significativa ($7,49 \pm 0,69 \text{ cm}$, Grupo B). Los niveles intermedios ($10\text{--}40 \text{ mg L}^{-1}$) mostraron diferencias menos marcadas y se agruparon estadísticamente entre los

Grupos A y B, lo que indica que la disminución más pronunciada se da entre las dosis extremas.

En cuanto a la textura del suelo, se observaron diferencias significativas ($p < 0,01$), con una tendencia clara: el suelo arenoso se ubicó en el Grupo A, seguido por el arcilloso (Grupo B) y el limoso (Grupo C). Este patrón puede explicarse por la mayor disponibilidad inmediata de fósforo en suelos arenosos, mientras que en suelos con mayor proporción de arcilla o limo, el fósforo tiende a fijarse en los coloides del suelo, reduciendo su biodisponibilidad, como señalan Navea et al. (2024) y Rengel (2022).

d. Modelos no-lineales:

La relación decreciente entre la concentración de fósforo y la longitud foliar se describió mediante el modelo de Bradley, el cual representó adecuadamente una disminución inicial pronunciada seguida de una fase de estabilización. Los parámetros ajustados para cada textura del suelo fueron los siguientes: arenoso ($a = -1,961 \pm 0,273$; $b = -0,00375 \pm 0,00238$; $R^2 = 0,945$; R^2 ajustado = 0,927), arcilloso ($a = -1,541 \pm 0,110$; $b = -0,0021 \pm 7,74 \times 10^{-4}$; $R^2 = 0,985$; R^2 ajustado = 0,978) y limoso ($a = -1,554 \pm 0,296$; $b = -0,00329 \pm 0,00294$; $R^2 = 0,902$; R^2 ajustado = 0,870).

El mejor ajuste se obtuvo para el sustrato arcilloso (R^2 ajustado = 0,978), lo que indica una relación más consistente y predecible entre la concentración de fósforo y la longitud foliar en este tipo de suelo. En contraste, el modelo correspondiente al sustrato limoso presentó una mayor dispersión en los datos, lo que sugiere la influencia de factores físicos adicionales, como la porosidad y la retención hídrica, que podrían afectar la disponibilidad efectiva del nutriente y, en consecuencia, la respuesta morfofisiológica del cultivo.

4.2.2. Longitud de Raíz

a. Análisis descriptivo

La longitud de la raíz mostró un patrón de incremento moderado con la elevación de la concentración de fósforo en la solución nutritiva, seguido de una fase de estabilización en los niveles más altos (Figuras 7a–c). En general, las raíces presentaron valores iniciales entre 6,0 y 7,5 cm a una concentración de 5 mg L^{-1} , dependiendo del tipo de sustrato. En suelo arenoso, la longitud promedio fue de $6,98 \pm 0,71 \text{ cm}$, mientras que en suelo arcilloso se registró un valor ligeramente menor ($6,18 \pm 0,52 \text{ cm}$). El sustrato limoso mostró una respuesta inicial intermedia, con $7,63 \pm 1,26 \text{ cm}$.

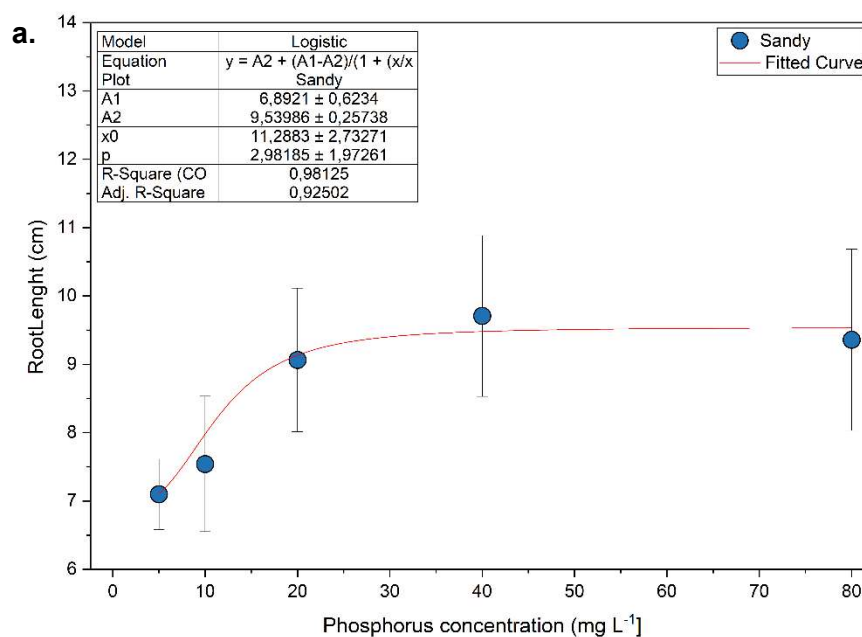
Al aumentar la concentración a 10 y 20 mg L^{-1} , se observó un incremento en la longitud de la raíz, alcanzando valores cercanos a $8,0$ – $9,0 \text{ cm}$ en los tres sustratos. El crecimiento más marcado se evidenció en el suelo arenoso, donde a 20 mg L^{-1} se obtuvo una media de $9,00 \pm 0,29 \text{ cm}$, mientras que en el limo se observaron valores de $8,74 \pm 1,26 \text{ cm}$. A 40 mg L^{-1} , las raíces alcanzaron su máxima expresión en la mayoría de los tratamientos, con longitudes promedio de $9,54 \pm 0,39 \text{ cm}$ (arena), $9,17 \pm 0,96 \text{ cm}$ (arcilla) y $9,91 \pm 0,93 \text{ cm}$ (limo). Más allá de este punto, a 80 mg L^{-1} , la longitud tendió a estabilizarse, manteniéndose en rangos entre $9,2$ y 10 cm , lo que sugiere un posible umbral de saturación fisiológica.

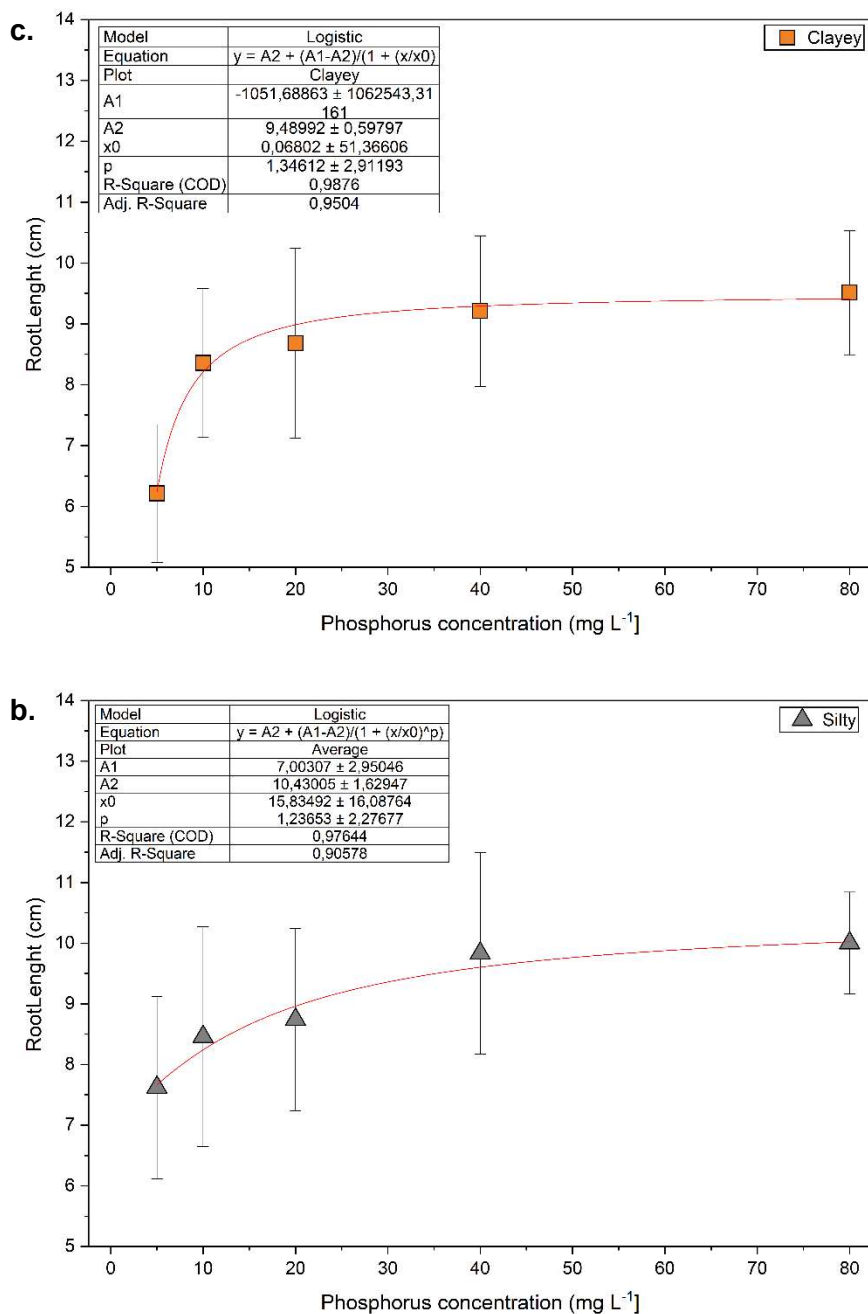
Según la textura del suelo, se identificó un orden claro: limoso ($8,91 \pm 0,36 \text{ cm}$) > arenoso ($8,54 \pm 1,03 \text{ cm}$) > arcilloso ($8,29 \pm 1,18 \text{ cm}$). Esto indica que los sustratos con

mayor retención hídrica, pero sin una fijación tan marcada del fósforo como ocurre en la arcilla, favorecieron un desarrollo radicular más extenso. El menor crecimiento observado en el suelo arcilloso puede asociarse a la fuerte adsorción del fósforo en sus superficies coloidales, lo que reduce su disponibilidad inmediata para la planta.

Figura 9

Longitud de raíz en función de la concentración de fósforo para sustratos arenoso, arcilloso y limoso.





Nota. Las Figura 9a–c representan la longitud radicular (cm) de plántulas de arroz cultivadas en tres texturas de suelo, ajustadas mediante un modelo logístico. Los datos son originales del presente estudio y los gráficos se generaron mediante OriginLab (versión académica 2023).

En conjunto, la tendencia general muestra que la longitud de raíz responde positivamente a niveles crecientes de fósforo hasta alcanzar un punto de saturación, lo que sugiere un efecto principalmente estimulante del nutriente sobre el crecimiento subterráneo.

b. Análisis de varianza (ANOVA bifactorial con submuestreo)

El ANOVA mostró que la concentración de fósforo tuvo un efecto altamente significativo sobre la longitud de la raíz ($F = 20,89$, $p < 0,0001$). Esto confirma que los distintos niveles del nutriente generan respuestas diferenciales en el crecimiento radicular. El factor textura también mostró un efecto significativo ($F = 4,02$, $p = 0,052$), aunque su contribución fue menor que la del fósforo y se ubicó en el límite del umbral de significancia.

El modelo completo explicó una proporción considerable de la variación observada ($F = 16,07$; $p < 0,0001$), con un error residual bajo (0,14), lo que indica una adecuada consistencia entre mediciones.

Estos resultados sugieren que la disponibilidad de fósforo en solución es el principal regulador del crecimiento radicular, mientras que la textura del sustrato modula esa respuesta de manera secundaria pero perceptible, afectando la movilidad del nutriente y la penetración física de la raíz.

c. Comparaciones de medias (Prueba de Tukey, $\alpha = 0,05$)

En el factor concentración, los tratamientos mostraron diferencias claras. La mayor longitud se obtuvo a 80 mg L^{-1} ($9,62 \pm 0,62 \text{ cm}$, Grupo A), seguida por 40 mg L^{-1}

($9,58 \pm 0,45$ cm, Grupo A). Los niveles de 20 mg L^{-1} ($8,82 \pm 0,48$ cm) y 10 mg L^{-1} ($8,12 \pm 0,50$ cm) se ubicaron en grupos intermedios (Grupos A/B y B, respectivamente). El menor valor correspondió a 5 mg L^{-1} ($6,98 \pm 0,71$ cm, Grupo C). Esta gradiente muestra que el incremento del fósforo se traduce en una mayor longitud de raíz, especialmente entre 5 y 20 mg L^{-1} , donde se observa el cambio más marcado.

Para el factor textura, el sustrato limoso presentó la mayor longitud promedio ($8,91$ cm, Grupo A), seguido por el arenoso ($8,54$ cm, Grupo A/B), y finalmente el arcilloso ($8,29$ cm, Grupo B). Este orden confirma que la retención de humedad y la estructura física del sustrato influyen en el desarrollo radicular, y que los suelos con alta proporción de arcilla limitan el crecimiento debido a una menor disponibilidad del fósforo adsorbido en los complejos coloidales.

d. Modelos no lineales

La relación entre la concentración de fósforo y la longitud de la raíz se ajustó adecuadamente mediante un modelo logístico en los tres sustratos. En el suelo arenoso, el modelo presentó parámetros $A1 = 6,89 \pm 0,62$, $A2 = 9,54 \pm 0,26$ y un $R^2 = 0,98$, indicando un ajuste robusto y una transición clara desde valores bajos hacia una meseta de estabilización. Para el sustrato limoso, el modelo también mostró un buen desempeño ($A2 = 10,43 \pm 1,63$; $R^2 = 0,97$), aunque con una mayor variabilidad en los datos iniciales. El suelo arcilloso presentó un ajuste igualmente alto ($A2 = 9,49 \pm 0,59$; $R^2 = 0,98$), pero con un valor atípico en el parámetro $A1$, probablemente asociado a la dispersión en la respuesta inicial bajo bajas dosis de fósforo.

El mejor ajuste se observó en el sustrato arcilloso (R^2 ajustado = 0,95), lo que sugiere que, aunque el crecimiento fue menor que en los otros suelos, la relación entre el fósforo disponible y la respuesta radicular fue más consistente. En contraste, la mayor dispersión en el sustrato limoso podría asociarse a variaciones en la retención de humedad o condiciones microestructurales que afectan la penetración radicular.

En síntesis, los modelos no lineales confirman que la longitud de la raíz aumenta con la disponibilidad de fósforo hasta alcanzar un límite fisiológico, con variaciones moderadas según la textura del suelo.

4.2.3. Biomasa Total

a. Análisis descriptivo

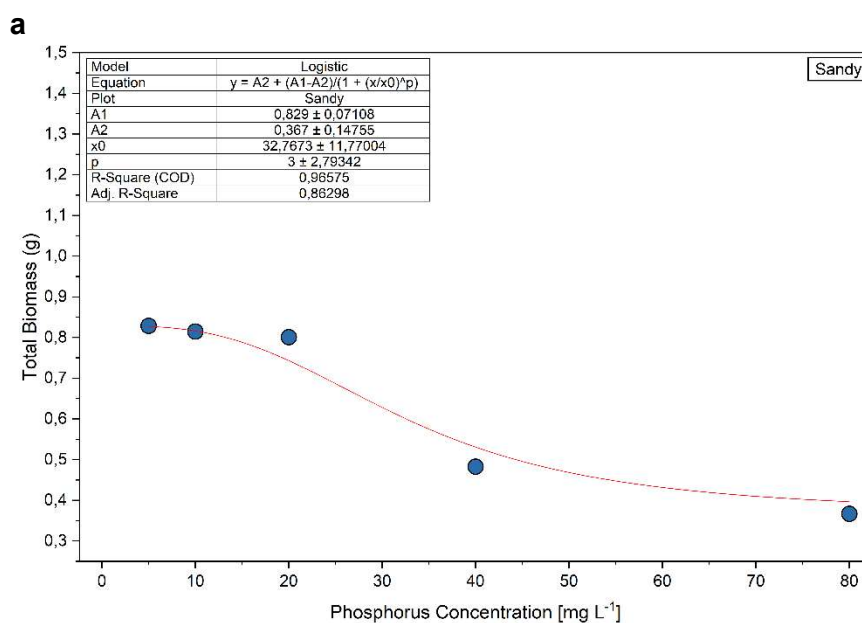
La biomasa total presentó una tendencia decreciente conforme aumentó la concentración de fósforo en la solución nutritiva (Figura 10). A una concentración de 5 mg L^{-1} se registraron los valores más elevados, con un promedio de $0,964 \pm 0,14 \text{ g}$. En el rango intermedio de 10 a 20 mg L^{-1} , la biomasa se redujo a valores cercanos a $0,75 \text{ g}$, mientras que a 40 mg L^{-1} descendió hasta aproximadamente $0,50 \text{ g}$. En la concentración más alta evaluada (80 mg L^{-1}), se observó el valor mínimo, correspondiente a $0,365 \pm 0,02 \text{ g}$.

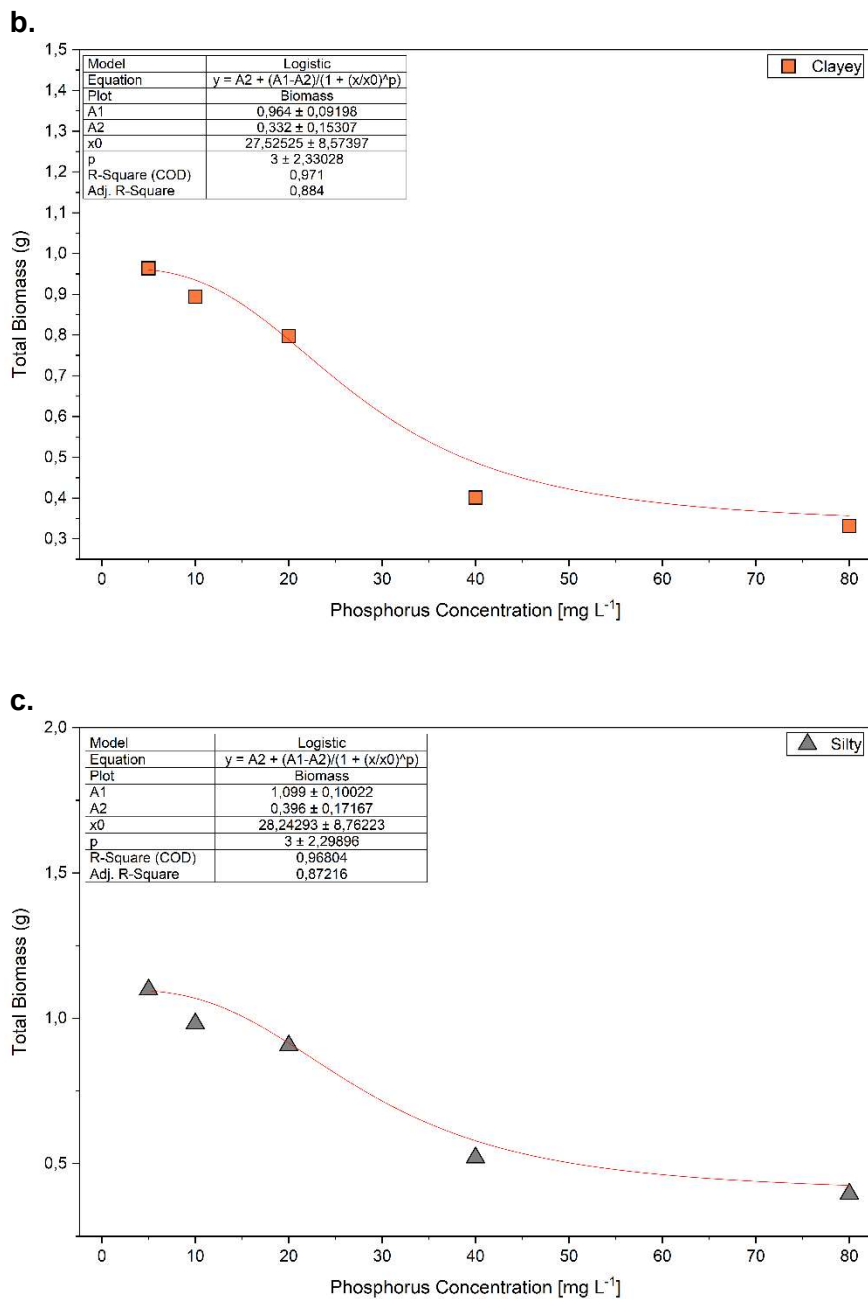
En cuanto al efecto de la textura del sustrato, se registraron valores promedio de biomasa de $0,769 \pm 0,27 \text{ g}$ en el suelo limoso, $0,677 \pm 0,19 \text{ g}$ en el arenoso y $0,621 \pm 0,29 \text{ g}$ en el arcilloso. Si bien los suelos limosos tendieron a favorecer una mayor acumulación de biomasa, las diferencias entre texturas no resultaron estadísticamente significativas según el análisis de varianza (ANOVA).

Estos resultados sugieren que el incremento en la concentración de fósforo puede ejercer un efecto limitante sobre la acumulación de biomasa total en plántulas de arroz, independientemente de la textura del suelo, aunque con ligeras ventajas en suelos de estructura más fina y mayor retención de humedad.

Figura 10

Biomasa de plántulas de arroz en función de la concentración de fósforo suministrado en solución acuosa en tres texturas de suelo: arenosa, arcillosa y limosa.





Nota. La Figura 10 muestra la variación de la biomasa de plántulas de arroz (*Oryza sativa*) en función de la concentración de fósforo (P) suministrado en solución acuosa, bajo tres tipos de textura del suelo.

En cada gráfico se observa una tendencia decreciente de la biomasa conforme aumenta la concentración del nutriente, evidenciando diferencias en la respuesta fisiológica de las

plántulas según la textura del sustrato. Los datos utilizados son originales, obtenidos en el presente estudio, y las curvas de ajuste y análisis estadísticos fueron elaborados en el software OriginLab (versión académica 2023, OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA). Esta representación gráfica permite visualizar el efecto diferencial del fósforo sobre el crecimiento vegetal en función de la capacidad de retención y disponibilidad del nutriente en cada tipo de textura.

b. Análisis de varianza (ANOVA bifactorial con submuestreo)

El análisis bifactorial evidenció que la concentración de fósforo tuvo un efecto altamente significativo sobre la biomasa total ($F = 16,52$; $p < 0,0001$), mientras que la textura del suelo no alcanzó significancia estadística ($F = 3,08$; $p = 0,073$). El modelo completo mostró un ajuste robusto ($F = 12,67$; $p < 0,0001$), con un error residual bajo ($0,011$), lo que indica que la mayor parte de la variación observada en la biomasa se explica fundamentalmente por el factor concentración.

En detalle, los resultados fueron los siguientes: concentración (B): $F = 16,52$; $p < 0,0001$ — efecto altamente significativo; textura (A): $F = 3,08$; $p = 0,073$ — efecto no significativo; y modelo completo: $F = 12,67$; $p < 0,0001$; error residual = $0,011$.

Estos resultados demuestran que el factor concentración de fósforo fue determinante en la reducción de la biomasa total, mientras que la textura del suelo desempeñó un papel modulador en la magnitud de la respuesta, sin ejercer un efecto estadísticamente fuerte. Ello sugiere que, bajo las condiciones experimentales evaluadas, la disponibilidad del fósforo es el principal factor limitante en la acumulación de biomasa, por encima de las variaciones texturales del sustrato.

c. Comparaciones de medias (Prueba de Tukey, $\alpha = 0,05$)

En relación con las concentraciones de fósforo, el valor más alto de biomasa total se registró a 5 mg L^{-1} , con un promedio de $0,964 \pm 0,13 \text{ g}$ (Grupo A). En contraste, la concentración más elevada evaluada, 80 mg L^{-1} , presentó una reducción significativa, alcanzando un valor de $0,365 \pm 0,03 \text{ g}$ (Grupo C). A partir de 20 mg L^{-1} , las diferencias entre tratamientos se volvieron estadísticamente significativas, distribuyéndose los tratamientos intermedios en los Grupos B y C. Este comportamiento refleja un claro efecto dosis–respuesta negativo, donde el aumento progresivo del fósforo en la solución nutritiva se asocia con una reducción sostenida en la biomasa total.

En cuanto a la textura del suelo, se observó una tendencia en el orden limoso > arenoso > arcilloso en la acumulación de biomasa. No obstante, las diferencias entre los tres tipos de sustrato no resultaron estadísticamente significativas ($p = 0,31$). Este resultado sugiere que, bajo las condiciones experimentales establecidas, la textura del suelo no tuvo un impacto determinante sobre la biomasa total, siendo el efecto principal atribuible a la concentración de fósforo disponible en el medio.

d. Modelos no-lineales

Se aplicó un modelo logístico para describir la relación entre la concentración de fósforo y la biomasa total, el cual representó adecuadamente la respuesta decreciente con una forma sigmoidea inversa. Los parámetros ajustados para cada textura del suelo fueron los siguientes: arenoso ($A_1 = 0,829 \pm 0,107$; $A_2 = 0,367 \pm 0,148$; $x_0 = 32,77 \pm 11,77$; $p = 3 \pm 2,79$; $R^2 = 0,967$; R^2 ajustado = 0,862), arcilloso ($A_1 = 0,964 \pm 0,092$; $A_2 = 0,332 \pm 0,153$; $x_0 = 27,53 \pm 5,87$; $p = 3 \pm 2,33$; $R^2 = 0,971$; R^2 ajustado = 0,884) y limoso ($A_1 = 1,099 \pm 0,100$; $A_2 = 0,396 \pm 0,172$; $x_0 = 28,24 \pm 8,76$; $p = 3 \pm 2,29$; $R^2 = 0,969$; R^2 ajustado = 0,872).

Los valores de los umbrales fisiológicos (x_0), situados entre 27 y 33 mg L⁻¹, indican que a partir de dichas concentraciones el fósforo ejerce un efecto inhibitorio sostenido sobre la acumulación de biomasa. Este comportamiento confirma la capacidad del modelo logístico para representar con precisión la dinámica no lineal de respuesta del cultivo ante incrementos en la disponibilidad del nutriente, evidenciando la existencia de un punto de saturación fisiológica a partir del cual el exceso de fósforo limita el crecimiento vegetal.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Xu et al. (2019), quienes describen que concentraciones elevadas de fósforo pueden alterar la dinámica del sistema suelo-planta, induciendo toxicidad y reduciendo la eficiencia en la acumulación de biomasa. Además, Ye et al. (2024) demostraron que suelos con mayor proporción de limo o arcilla mejoran la disponibilidad y absorción de nutrientes, lo cual podría favorecer el crecimiento vegetal, aunque en este experimento las diferencias no alcanzaron significancia estadística, posiblemente debido a la variabilidad experimental.

4.3. Respuesta a nitrógeno (N)

Se evaluaron dos variables de respuesta: longitud de la hoja (cm) y biomasa total (g) en función de la concentración de nitrógeno en solución (10, 20, 40, 80 y 160 mg L⁻¹) y de la textura del suelo (arenosa, arcillosa y limosa).

4.3.1. Longitud de la hoja

a. Análisis descriptivo

La longitud foliar de las plántulas de arroz presentó un patrón de crecimiento progresivo con tendencia sigmoidea conforme aumentó la concentración de nitrógeno en la solución nutritiva (Figura 11). En las dosis bajas, comprendidas entre 10 y 20 mg L⁻¹, las hojas

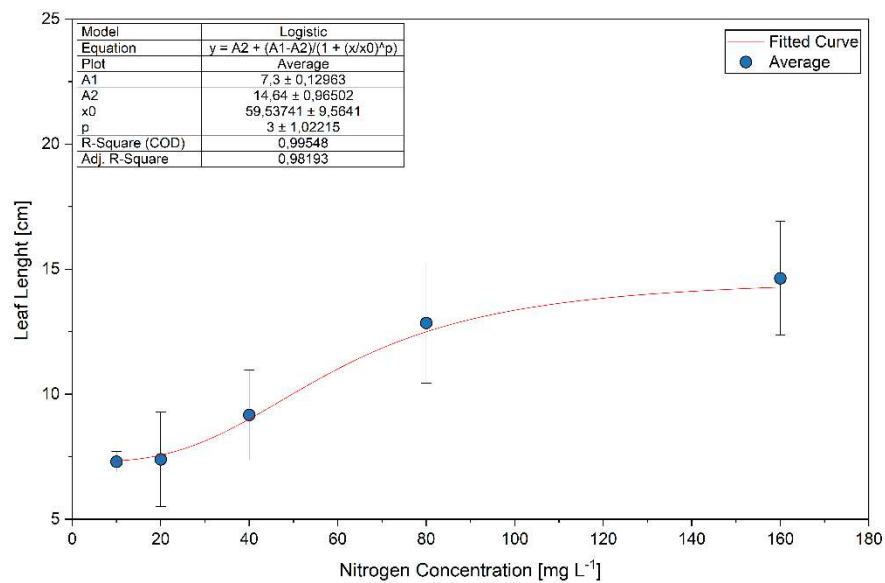
alcanzaron longitudes de entre 7,3 y 10,4 cm, dependiendo de la textura del sustrato. En el rango intermedio de 40 a 80 mg L⁻¹ se observó un incremento pronunciado, con valores promedio de 12 a 13 cm. Finalmente, a la concentración máxima de 160 mg L⁻¹, la longitud foliar alcanzó un punto de saturación, con valores próximos a 13–15 cm según la textura, lo que indica que la respuesta del cultivo dejó de aumentar de manera significativa más allá de este nivel.

En relación con la textura del suelo, se evidenció una jerarquía clara en la respuesta: el sustrato arenoso presentó la mayor longitud promedio (hasta 14,6 cm a 160 mg L⁻¹), seguido por el arcilloso (12,7 cm) y el limoso (13,0 cm, con tendencia más estable). Este comportamiento sugiere que los suelos más aireados, como los arenosos, favorecen una respuesta más pronunciada en la elongación foliar, mientras que los sustratos limosos y arcillosos, debido a sus mayores restricciones físicas y menor aireación, limitan parcialmente el aprovechamiento eficiente del nitrógeno por parte de las plantas.

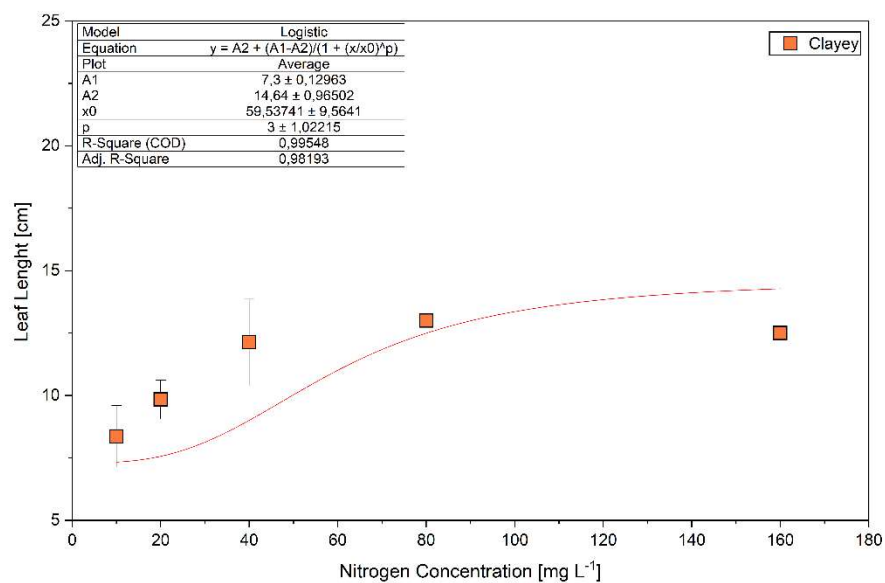
Figura 11.

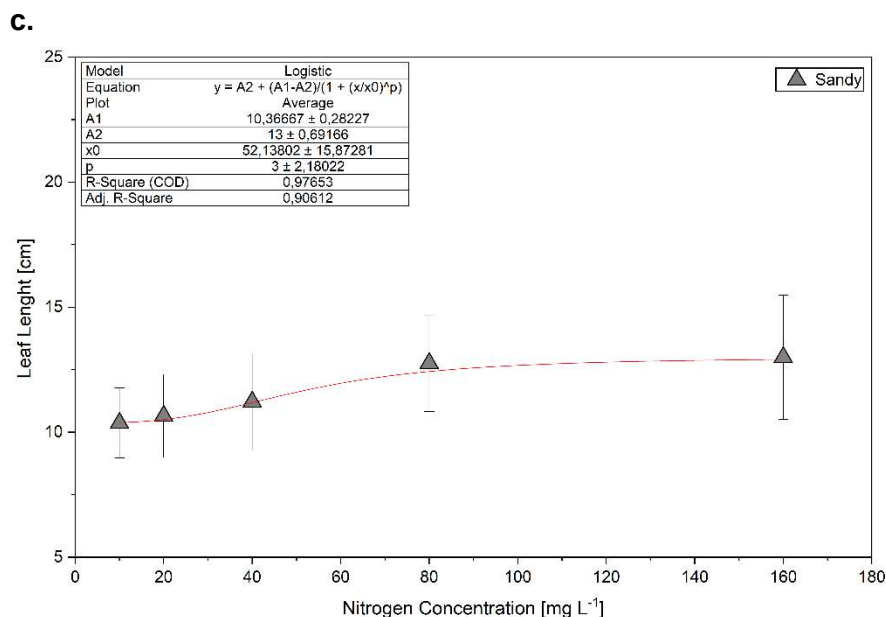
Longitud foliar de plántulas de arroz en función de la concentración de nitrógeno suministrado en solución acuosa en tres texturas de suelo: (a) arenosa, (b) arcillosa y (c) limosa.

a.



b.





Nota. La Figura 11 muestra la longitud foliar de plántulas de arroz (*Oryza sativa*) en función de la concentración de nitrógeno (N) suministrado en solución acuosa, bajo tres tipos de textura del sustrato. Los datos son originales, obtenidos en el presente estudio, y las curvas de ajuste fueron generadas mediante análisis estadístico en el software software OriginLab (versión académica 2023, OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA).

En general, se observa una tendencia creciente de la longitud foliar con el aumento de la concentración de nitrógeno, alcanzando una estabilización a niveles intermedios del nutriente, lo que sugiere un punto de saturación fisiológica. Estas tendencias reflejan la influencia del nitrógeno en el crecimiento foliar y su interacción con la textura del sustrato, donde las diferencias en retención y disponibilidad del nutriente afectan la magnitud de respuesta de las plántulas.

b. Análisis de varianza (ANOVA bifactorial con submuestreo)

El análisis estadístico mostró que la concentración de nitrógeno tuvo un efecto significativo sobre la longitud foliar ($F = 3,83$; $p = 0,033$), lo que confirma que las dosis del

nutriente generan diferencias medibles en el crecimiento. Aunque el efecto no fue tan marcado como el observado para el fósforo, la significancia estadística indica que el nitrógeno actúa como un regulador directo del desarrollo aéreo durante la etapa temprana de crecimiento.

En contraste, la textura del suelo no presentó un efecto significativo ($F = 0,07$; $p = 0,931$), lo que sugiere que, bajo las condiciones del experimento, la estructura física del sustrato no modificó de manera relevante la respuesta de las plántulas al nitrógeno. Este resultado difiere de lo observado para otros nutrientes, donde la textura puede influir en la disponibilidad y movilidad, pero concuerda con estudios donde el nitrógeno, por su alta solubilidad, se desplaza con mayor libertad independientemente de la granulometría.

El modelo completo tampoco resultó significativo ($F = 2,75$; $p = 0,071$), aunque se ubicó cerca del umbral estadístico. El error residual moderado ($MS = 2,87$) indica variabilidad entre réplicas, pero sin comprometer la coherencia general del patrón observado.

En síntesis, los resultados muestran que: (1) el nitrógeno sí generó diferencias significativas en la elongación foliar ($p = 0,033$); (2) la textura del suelo no ejerció influencia estadísticamente detectable ($p = 0,931$); y (3) el modelo global presentó tendencias consistentes, aunque sin alcanzar significancia global estricta ($p = 0,071$). Aun así, el factor nitrógeno se posiciona como el elemento principal en la modulación del crecimiento foliar.

c. Comparaciones de medias (Prueba de Tukey, $\alpha = 0,05$):

La prueba de Tukey confirmó que las concentraciones de nitrógeno difieren significativamente entre sí. Las mayores longitudes foliares se registraron en las dosis elevadas, particularmente 160 mg L^{-1} (13,38 cm) y 80 mg L^{-1} (12,87 cm), ambas agrupadas en el nivel estadístico superior (Grupo A). Las dosis intermedias de 40 mg L^{-1} (10,83 cm) y 0 mg

L^{-1} (9,98 cm) también se ubicaron en el mismo grupo, aunque con valores ligeramente menores. Las dosis bajas, 20 mg L^{-1} (9,29 cm) y 10 mg L^{-1} (8,67 cm), mostraron las menores elongaciones, aunque sin separarse de manera contundente según el agrupamiento estadístico. En conjunto, estos resultados sugieren un aumento progresivo en longitud con niveles crecientes de nitrógeno, con un posible umbral de saturación fisiológica entre 80 y 160 mg L^{-1} .

En cuanto a la textura del suelo, la prueba de Tukey no mostró diferencias significativas entre las medias, coherente con el resultado del ANOVA. Sin embargo, se observó una ligera tendencia: limo (11,04 cm) > arcilla (10,79 cm) > arena (10,68 cm). Aunque estas diferencias no alcanzaron significancia estadística, reflejan variaciones asociadas a la retención hídrica y la estructura del sustrato, pero insuficientes para modificar la respuesta al nitrógeno de manera consistente.

d. Modelos no-lineales:

La relación entre la concentración de nitrógeno y la longitud foliar se describió mediante un modelo logístico, el cual representó de manera precisa las fases de crecimiento inicial, el punto de inflexión y la posterior estabilización. Los parámetros estimados para cada textura del suelo fueron los siguientes: arenoso ($A_1 = 7,3 \pm 0,13$; $A_2 = 14,64 \pm 0,97$; $x_0 = 59,5 \pm 9,6$; $p = 3 \pm 1,02$; $R^2 = 0,996$; R^2 ajustado = 0,982), arcilloso ($A_1 = 8,17 \pm 0,59$; $A_2 = 12,75 \pm 0,32$; $x_0 = 23,4 \pm 3,19$; $p = 3,63 \pm 1,65$; $R^2 = 0,990$; R^2 ajustado = 0,960) y limoso ($A_1 = 10,37 \pm 0,28$; $A_2 = 13,0 \pm 0,69$; $x_0 = 52,1 \pm 15,9$; $p = 3 \pm 2,18$; $R^2 = 0,977$; R^2 ajustado = 0,906).

Los tres modelos mostraron un excelente nivel de ajuste ($R^2 > 0,90$), lo que evidencia su capacidad para describir con precisión la dinámica de respuesta del cultivo. El umbral

fisiológico (x_0) se ubicó en valores más bajos para el sustrato arcilloso ($\sim 23 \text{ mg L}^{-1}$), lo que sugiere que pequeñas dosis de nitrógeno son suficientes para inducir incrementos rápidos en la longitud foliar. En cambio, los umbrales observados en los sustratos arenoso y limoso ($\sim 50\text{--}60 \text{ mg L}^{-1}$) indican que se requieren concentraciones mayores para alcanzar la fase de máxima respuesta. Estos resultados confirman que la textura del suelo influye de manera determinante en el punto crítico de respuesta del cultivo frente al suministro de nitrógeno.

Este patrón de respuesta positiva al nitrógeno es consistente con lo reportado por (Fageria et al., 2010), quienes destacan el papel esencial del N en la síntesis de clorofila y proteínas estructurales, promoviendo la expansión foliar en cultivos como el arroz. Además, señalan que más allá de cierto umbral, los aumentos en dosis de N dejan de traducirse en mayor crecimiento, en línea con el comportamiento sigmoideo observado en este estudio.

4.3.2. Longitud de Raíz

a. Análisis descriptivo

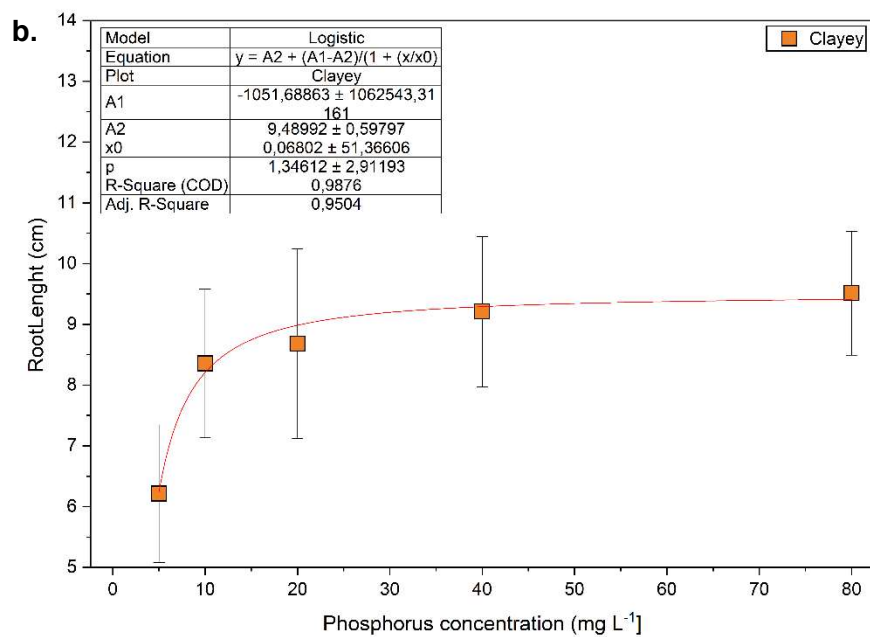
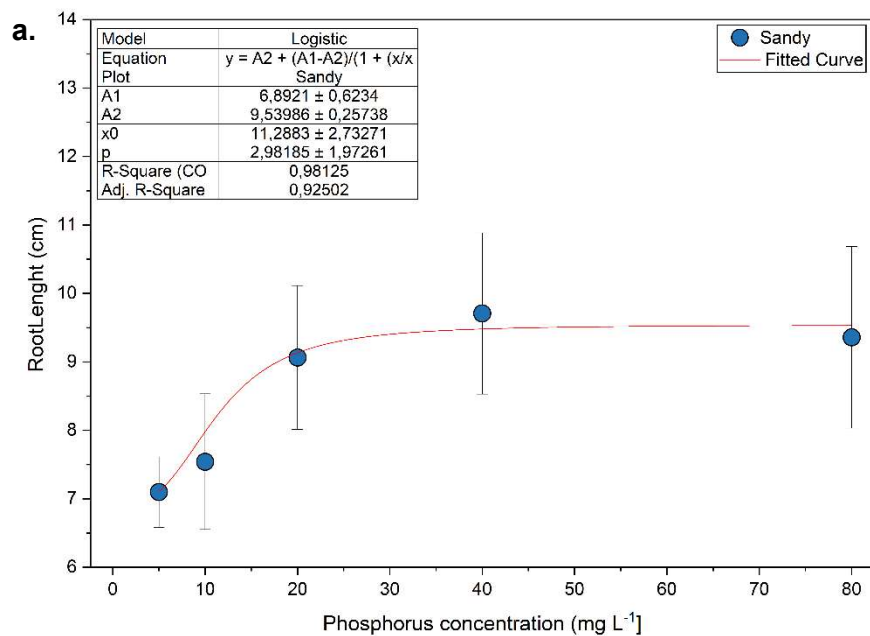
La longitud de la raíz mostró una respuesta creciente conforme aumentó la concentración de nitrógeno en la solución nutritiva, siguiendo un patrón sigmoideo moderado similar al observado en otras variables de crecimiento (Figura 10). En las concentraciones más bajas (10 y 20 mg L^{-1}), las raíces presentaron longitudes entre $4,4$ y $5,7 \text{ cm}$ según el sustrato. En niveles intermedios, especialmente a 40 y 80 mg L^{-1} , se observó un incremento claro, alcanzando valores promedio de $7,1$ a $8,0 \text{ cm}$. Finalmente, a la concentración máxima de 160 mg L^{-1} , la elongación radicular tendió a estabilizarse, con longitudes cercanas a $7,8\text{--}8,0 \text{ cm}$ dependiendo de la textura del sustrato.

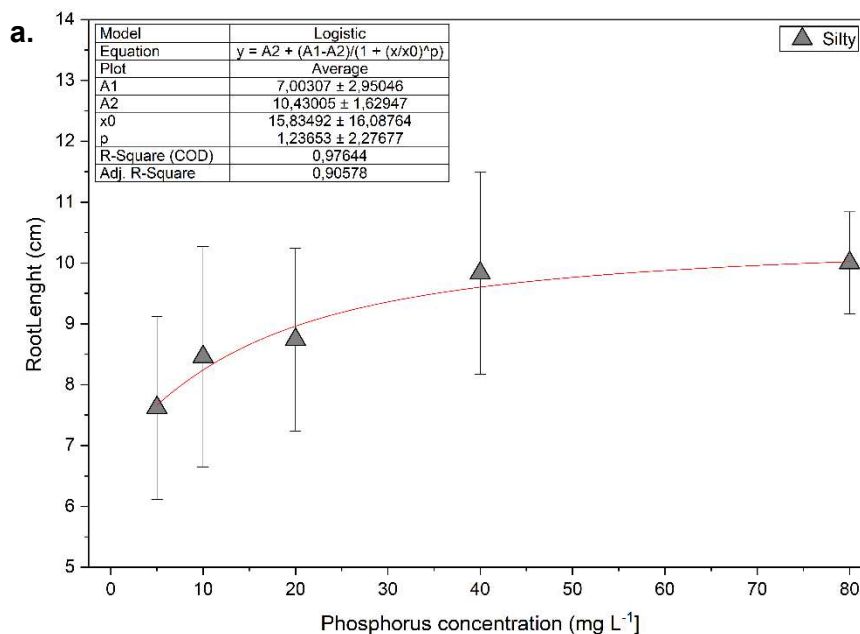
En cuanto al efecto del tipo de suelo, se observó una jerarquía definida: las raíces más largas se registraron en el sustrato arcilloso ($7,78 \pm 1,89 \text{ cm}$), seguido del limoso ($5,74 \pm 0,79$

cm), mientras que el sustrato arenoso presentó los valores más bajos ($4,95 \pm 1,32$ cm). Este patrón indica que los sustratos con mayor capacidad de retención de humedad y mayor densidad aparente, como los arcillosos, favorecieron una elongación radicular más marcada, posiblemente por proveer un ambiente más estable y húmedo para la penetración y exploración de raíces. En contraste, el suelo arenoso, por su baja cohesión y menor retención hídrica, limitó parcialmente el desarrollo radicular bajo las mismas condiciones de disponibilidad de nitrógeno.

Figura 12

Longitud radicular de plántulas de arroz en función de la concentración de nitrógeno suministrado en solución acuosa en tres texturas de suelo: (a) arenosa, (b) arcillosa y (c) limosa.





Nota. La Figura 12a–c muestran la longitud de raíz (cm) bajo tres texturas de sustrato. Los datos provienen del experimento realizado en este estudio, y las curvas se ajustaron mediante modelos logísticos desarrollados en OriginLab (versión académica 2023).

En general, la tendencia indica un aumento progresivo de la longitud de la raíz conforme se incrementa la concentración de nitrógeno, hasta alcanzar un punto de estabilización fisiológica alrededor de los 80–160 mg L⁻¹.

b. Análisis de varianza (ANOVA bifactorial con submuestreo)

El análisis de varianza mostró diferencias significativas tanto para la concentración de nitrógeno como para la textura del sustrato. El factor soluto presentó un efecto significativo sobre la longitud radicular ($F = 5,19$; $p = 0,013$), lo que confirma que los niveles crecientes de nitrógeno generaron cambios medibles en la elongación de las raíces.

La textura del sustrato también presentó un efecto altamente significativo ($F = 14,62$; $p = 0,001$), indicando que las características físicas del suelo influyen de manera notable en el

desarrollo radicular. Este resultado coincide con la variación observada en las medias, donde el suelo arcilloso mostró una marcada ventaja en longitud frente al arenoso y al limoso.

El modelo completo resultó significativo ($F = 7,89$; $p = 0,002$), con un error residual bajo (0,83), lo que demuestra que la variabilidad observada se explica adecuadamente mediante los factores incluidos en el diseño experimental.

En conjunto, estos resultados evidencian que: (1) el nitrógeno actúa como un factor determinante en la elongación de la raíz; (2) la textura del suelo modula esta respuesta de forma significativa, siendo uno de los elementos físicos más influyentes en la arquitectura radicular; y (3) el modelo global presenta un ajuste sólido y estadísticamente consistente.

c. Comparaciones de medias (Prueba de Tukey, $\alpha = 0,05$)

La prueba de Tukey mostró diferencias significativas entre las concentraciones de nitrógeno. Las mayores longitudes radiculares se registraron en 160 mg L^{-1} (7,78 cm), agrupado en el nivel estadístico superior (Grupo A). Las concentraciones de 80 mg L^{-1} (7,06 cm) y 0 mg L^{-1} (6,38 cm) también se ubicaron en el grupo superior, aunque con valores ligeramente menores. En cambio, las concentraciones más bajas de 20 mg L^{-1} (5,38 cm) y 10 mg L^{-1} (4,45 cm) se ubicaron en grupos inferiores (B), reflejando un crecimiento limitado bajo condiciones de menor disponibilidad de nitrógeno.

Respecto a la textura del suelo, el sustrato arcilloso mostró la mayor longitud radicular (7,78 cm, Grupo A), seguido del limoso (5,74 cm, Grupo A/B), mientras que el arenoso presentó las raíces más cortas (4,95 cm, Grupo B). Esta separación estadística confirma que la textura del suelo ejerce un efecto directo sobre la expresión del crecimiento radicular.

En conjunto, los resultados de Tukey respaldan los patrones observados en el ANOVA y evidencian un incremento consistente de la longitud radicular a medida que se incrementan las concentraciones de nitrógeno.

d. Modelos no lineales

La relación entre la concentración de nitrógeno y la longitud de la raíz se ajustó mediante modelos logísticos para cada textura del sustrato. En el sustrato arcilloso, el modelo mostró un ajuste excelente ($R^2 = 1,0$), con valores de $A_1 = 5,52 \pm 0,09$ y $A_2 = 10,66 \pm 0,05$, describiendo una transición clara desde valores bajos hacia una meseta en concentraciones altas. El umbral fisiológico ($x_0 = 49,00 \pm 1,61 \text{ mg L}^{-1}$) indica que a partir de niveles moderados de nitrógeno el crecimiento radicular se acelera de manera notable.

En el sustrato limoso, el modelo también presentó un buen ajuste ($R^2 = 0,94$), aunque con mayor variabilidad en los parámetros, particularmente en A_2 ($7,60 \pm 18,48$). La fase de saturación fue menos evidente, lo que sugiere una respuesta más dispersa en este tipo de suelo. Para el sustrato arenoso, el ajuste fue moderado ($R^2 = 0,90$; R^2 ajustado = $0,63$), reflejando mayor variabilidad en las mediciones y posiblemente una interacción más compleja entre disponibilidad de agua, textura y penetración radicular.

En conjunto, los modelos logísticos confirmaron que la longitud de la raíz aumenta de forma sigmoidea con el incremento del nitrógeno, aunque la estabilidad y claridad del ajuste dependen de la textura del sustrato.

4.3.3. Biomasa

a. Análisis descriptivo

La biomasa total presentó una tendencia decreciente conforme aumentó la concentración de nitrógeno en la solución nutritiva (Figura 13). En las concentraciones más bajas ($10\text{--}20 \text{ mg L}^{-1}$), se registraron los valores máximos, con promedios entre $0,018$ y $0,020 \text{ g}$. A 40 mg L^{-1} , la biomasa disminuyó hasta aproximadamente $0,011 \text{ g}$, mientras que a 80 mg L^{-1}

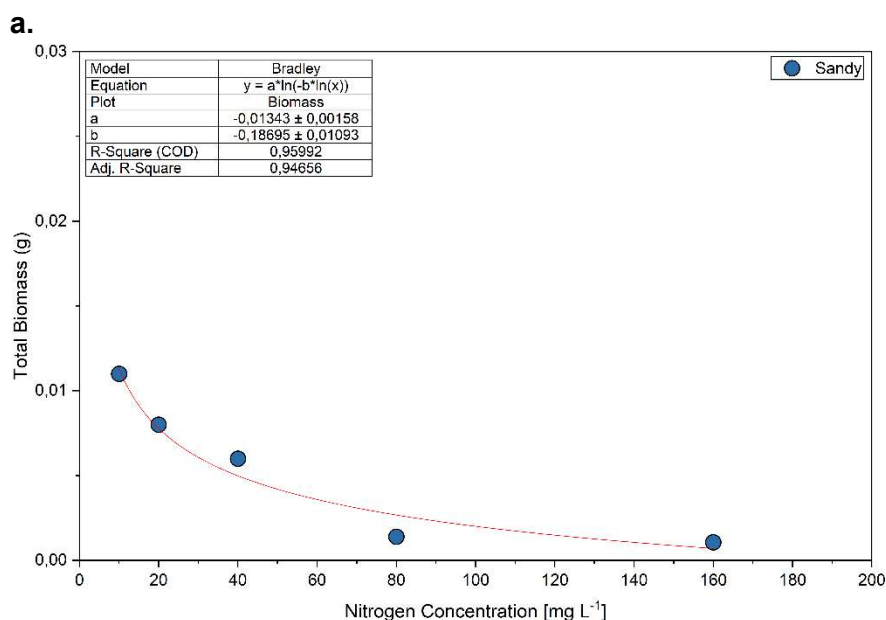
se observó una reducción drástica, con valores de 0,004 a 0,006 g. En la dosis más elevada (160 mg L⁻¹), se alcanzaron los mínimos experimentales, entre 0,002 y 0,003 g.

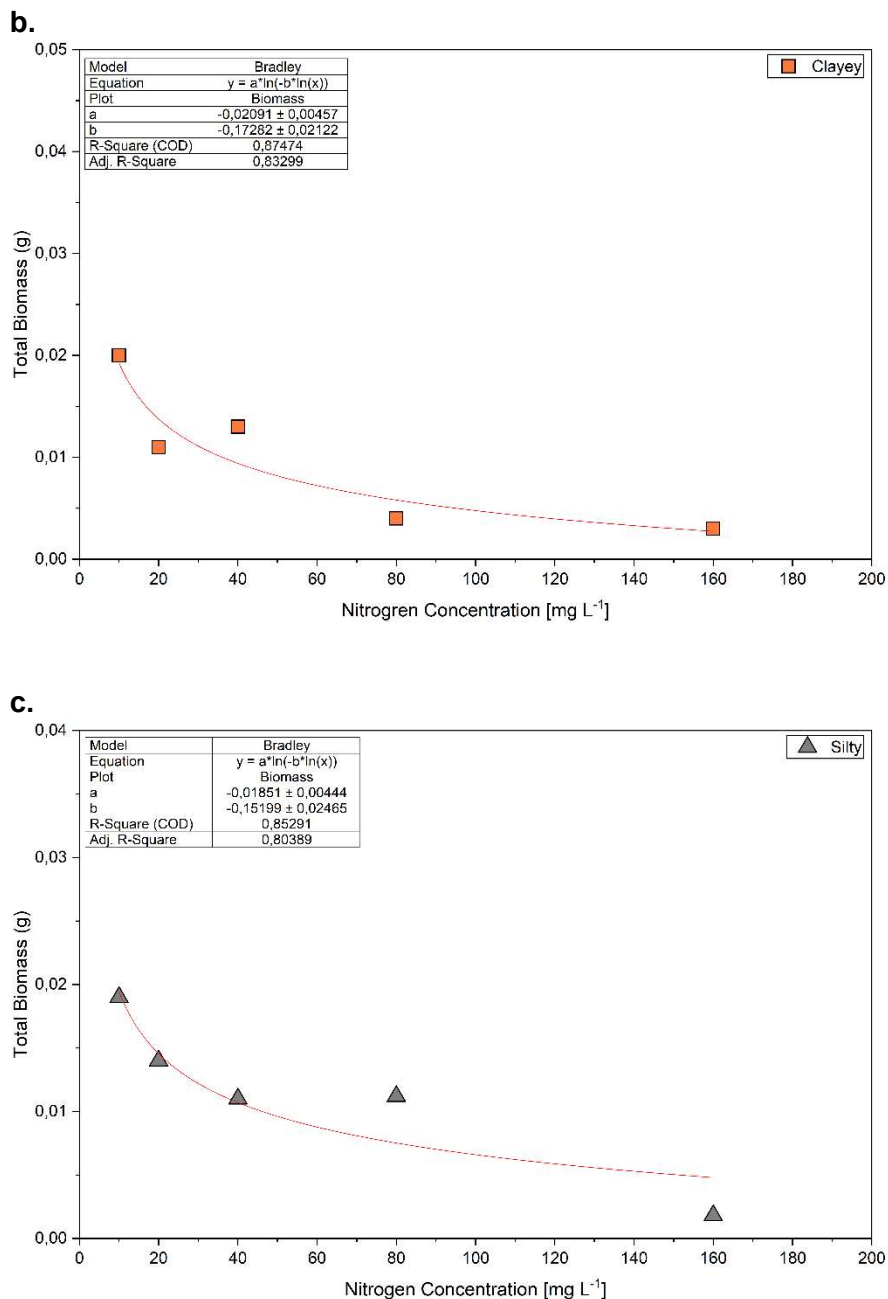
En cuanto a la influencia de la textura del sustrato, el comportamiento fue similar en todos los tipos de suelo, aunque con diferencias en magnitud: en el sustrato arcilloso, la biomasa descendió de 0,020 g a 10 mg L⁻¹ a 0,003 g a 160 mg L⁻¹; en el arenoso, de 0,012 g a 0,002 g; y en el limoso, de 0,019 g a 0,003 g.

Este patrón sugiere un efecto inhibitorio asociado al exceso de nitrógeno, posiblemente derivado de fenómenos de toxicidad o de un desequilibrio osmótico en el medio radicular, los cuales pueden comprometer tanto la absorción de agua como la eficiencia metabólica de las plántulas.

Figura 13

Biomasa de plántulas de arroz en función de la concentración de nitrógeno suministrado en solución acuosa en tres texturas de suelo: (a) arenosa, (b) arcillosa y (c) limosa.





Nota. La Figura 13 muestra la biomasa de plántulas de arroz (*Oryza sativa*) en función de la concentración de nitrógeno (N) suministrado en solución acuosa, bajo tres tipos de textura del sustrato. Los datos presentados son originales, obtenidos en el presente estudio, y las curvas de ajuste fueron generadas mediante análisis estadístico en el software software OriginLab (versión académica 2023, OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA).

En todos los casos se observa una tendencia decreciente de la biomasa a medida que aumenta la concentración de nitrógeno, lo que sugiere posibles efectos de toxicidad o desequilibrio iónico a altas dosis del nutriente. Las diferencias entre texturas evidencian que la retención y disponibilidad de nitrógeno varían según el tipo de sustrato, afectando la eficiencia de absorción y el crecimiento de las plántulas.

b. Análisis de varianza (ANOVA bifactorial con submuestreo)

El análisis estadístico mostró que la concentración de nitrógeno no tuvo un efecto significativo sobre la acumulación de biomasa ($F = 1,45$; $p = 0,2851$). Aunque se observaron variaciones en los valores medios entre tratamientos, estas diferencias no fueron lo suficientemente consistentes como para considerarse estadísticamente relevantes bajo el nivel de significancia del 5 %. Este resultado sugiere que, dentro del rango evaluado, las dosis de nitrógeno no modificaron de manera clara la acumulación de biomasa en las plántulas.

De forma similar, la textura del sustrato tampoco presentó un efecto significativo ($F = 0,82$; $p = 0,4657$), lo que indica que los suelos arenosos, arcillosos y limosos generaron respuestas comparables respecto a la biomasa total. La ausencia de diferencias entre texturas señala que, para esta variable, las propiedades físico-químicas del sustrato no condicionaron de manera determinante la respuesta fisiológica de las plantas al nitrógeno.

El modelo completo tampoco resultó significativo ($F = 1,28$; $p = 0,3498$), acompañado de un error residual bajo ($MS = 0,0069$), lo que indica coherencia interna en las mediciones, aunque sin patrones estadísticos claros entre los factores evaluados.

En conjunto, los resultados muestran que: (1) las concentraciones de nitrógeno no explicaron diferencias significativas en la biomasa total; (2) la textura del suelo tampoco tuvo incidencia detectable; y (3) el modelo global confirma una variabilidad limitada entre tratamientos, sin asociaciones estadísticas robustas.

c. Comparaciones de medias (Prueba de Tukey, $\alpha = 0,05$)

La prueba de Tukey confirmó que no existen diferencias significativas entre los niveles de nitrógeno, ya que todas las concentraciones evaluadas (0 a 160 mg L⁻¹) se ubicaron en un mismo grupo estadístico (Grupo A). Las medias oscilaron entre 0,001 y 0,016 g de biomasa, pero sin separaciones estadísticas, lo cual coincide con el ANOVA y sugiere que la biomasa no respondió de forma clara a las variaciones en la disponibilidad de nitrógeno.

En cuanto a la textura del sustrato, las medias de biomasa de los suelos arenoso (0,068 g), arcilloso (0,061 g) y limoso (0,013 g) también se agruparon en un único grupo (Grupo A), reafirmando la ausencia de diferencias significativas entre ellos. Aunque el suelo limoso mostró el valor promedio más bajo, esta diferencia no fue estadísticamente suficiente para establecer una separación entre grupos.

En conjunto, las comparaciones de Tukey muestran que ni la concentración de nitrógeno ni la textura del suelo generaron patrones diferenciados en la acumulación de biomasa, lo que concuerda plenamente con los resultados del ANOVA.

d. Modelos no-lineales

La relación entre la concentración de nitrógeno y la biomasa total se describió mediante el modelo de Bradley, el cual representó adecuadamente una disminución rápida inicial seguida de una estabilización en valores bajos. Los parámetros ajustados fueron los siguientes:

arenoso ($a = -0,0134 \pm 0,0016$; $b = -0,1869 \pm 0,0109$; $R^2 = 0,960$; R^2 ajustado = 0,947),
arcilloso ($a = -0,0209 \pm 0,0046$; $b = -0,1728 \pm 0,0212$; $R^2 = 0,874$; R^2 ajustado = 0,833) y
limoso ($a = -0,0185 \pm 0,0044$; $b = -0,1520 \pm 0,0247$; $R^2 = 0,853$; R^2 ajustado = 0,804).

El mejor ajuste se obtuvo para el sustrato arenoso (R^2 ajustado = 0,95), lo que sugiere una relación más consistente entre la concentración de nitrógeno y la reducción de biomasa en este tipo de suelo. En cambio, la mayor dispersión observada en los sustratos arcilloso y limoso indica la posible influencia de factores físicos adicionales —como la aireación, la estructura porosa y la capacidad de retención de agua— que modulan la respuesta fisiológica del cultivo frente al exceso de nitrógeno en el medio.

Esta tendencia coincide con lo reportado por Du et al. (2020), quienes demostraron que dosis excesivas de nitrógeno en arroz generan acumulación de nitrógeno inorgánico (NH_4^+ , NO_3^-), promoviendo estrés oxidativo y alteraciones metabólicas. Aunque puede observarse un aumento en elongación foliar, no siempre se traduce en mayor biomasa, debido a los efectos adversos sobre la eficiencia fisiológica y el metabolismo.

CAPÍTULO V

5.1. Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos en este estudio, centrados en las etapas de emergencia y vegetativa temprana del arroz, revelan que ya desde estas fases críticas se manifiestan diferencias claras en la absorción de nutrientes según la textura del suelo y la concentración aplicada. Esta sensibilidad temprana, observada en variables como la biomasa y la longitud de raíz, refuerza la importancia agronómica de intervenir nutricionalmente desde los primeros días del cultivo. La literatura técnica reconoce que estas etapas iniciales son determinantes para establecer la densidad, el vigor y el potencial de rendimiento del arroz (Linscombe, 2016; UC Cooperative Extension, 2023). A diferencia de otros estudios que no especifican con precisión el momento fenológico de evaluación, este enfoque permite interpretar con mayor claridad la dinámica de absorción inicial. Así, los patrones identificados aquí no solo explican variaciones tempranas en el crecimiento, sino que ofrecen indicios sobre cómo la textura del suelo puede modular la eficiencia de fertilización desde el inicio del ciclo, algo que frecuentemente se subestima en investigaciones centradas exclusivamente en rendimiento de grano.

5.1.1. Efecto del potasio (K^+) en la longitud radicular y la biomasa de arroz

El potasio generó en las plántulas de arroz dos patrones contrastantes: por un lado, la longitud radicular disminuyó de manera marcada a medida que aumentó la concentración de K^+ , mientras que, por otro, la biomasa total se incrementó siguiendo un patrón sigmoideo hasta alcanzar un umbral de saturación cercano a 40 mg L^{-1} ($\sim 10\text{--}13 \text{ kg/ha}$).

La reducción progresiva de la longitud radicular concuerda plenamente con los resultados experimentales, que mostraron descensos abruptos incluso entre 5 y 20 mg L^{-1} , con

valores mínimos registrados a 40 mg L^{-1} . Este comportamiento indica que concentraciones elevadas de potasio interfieren con los procesos de elongación celular desde etapas tempranas. El efecto inhibitorio fue más pronunciado en sustratos arcillosos y limosos, lo cual se relaciona con su alta capacidad de retención de humedad y su mayor CIC, que prolongan la exposición de las raíces a niveles elevados de K^+ en la rizosfera. En contraste, los suelos arenosos favorecieron raíces más largas en todos los niveles evaluados, probablemente debido a una menor retención de sales y una mejor aireación, lo cual reduce el estrés osmótico. Este patrón es coherente con estudios que indican que transportadores como KUP9 y TRH1 responden a la disponibilidad de K^+ modulando la distribución de auxinas en el ápice radical (Mostofa et al., 2022).

A diferencia de la respuesta radicular, la biomasa total aumentó progresivamente con la concentración de potasio, alcanzando valores máximos alrededor de 40 mg L^{-1} . Los sustratos limosos y arcillosos mostraron la mayor acumulación de biomasa, coherente con su mayor capacidad para retener humedad y nutrientes, mientras que el sustrato arenoso registró los valores más bajos. Este incremento es consistente con lo reportado por Ranjan & Singh (2021), quienes observaron que el potasio estimula el crecimiento vegetal hasta un punto de saturación, más allá del cual no se producen ganancias adicionales.

Los modelos no lineales reforzaron estos patrones. El modelo de Bradley describió eficazmente la caída abrupta de la longitud radicular y su posterior estabilización en valores mínimos, con ajustes particularmente sólidos en el sustrato arcilloso. En cuanto a la biomasa, los modelos logísticos identificaron un punto de inflexión entre 25 y 40 mg L^{-1} , lo que representa el umbral fisiológico de máxima respuesta. Si bien la magnitud de la biomasa fue mayor en el sustrato limoso, el mejor ajuste estadístico del modelo se observó en el arenoso, lo que sugiere que este suelo presentó una dinámica más estable y predecible en la respuesta.

En conjunto, los resultados indican que el potasio es un factor determinante en las etapas iniciales de crecimiento del arroz, pero su efecto depende de la textura del suelo. En sustratos arenosos se favorece el desarrollo radicular, mientras que en sustratos arcillosos y limosos se optimiza la acumulación de biomasa. Esto resalta la importancia de considerar la interacción suelo–nutriente al diseñar estrategias de fertilización más eficientes y ajustadas al contexto edáfico.

5.1.2. Efecto del fósforo (P) en la longitud foliar, longitud radicular y la biomasa de arroz

El fósforo mostró patrones diferenciados en las plántulas de arroz: la longitud foliar y la biomasa total disminuyeron conforme aumentó su concentración, mientras que la longitud radicular presentó una respuesta positiva hasta alcanzar una meseta fisiológica. Esta divergencia entre órganos refleja la forma en que el cultivo prioriza distintos procesos bajo disponibilidad variable de P durante las primeras etapas de establecimiento.

En la longitud foliar se observó una reducción clara entre 5 y 20 mg L⁻¹, seguida de una estabilización parcial en concentraciones superiores. Este comportamiento decreciente concuerda con los resultados del ANOVA, que mostró efectos altamente significativos tanto de la concentración como de la textura del suelo. La disminución inicial sugiere un efecto inhibitorio del fósforo en exceso, posiblemente asociado a desbalances nutricionales que reducen la disponibilidad de micronutrientes clave como zinc e hierro, esenciales para la expansión celular (Gao et al., 2023). Las texturas también modulaban la magnitud de la respuesta: los suelos arenosos favorecieron mayor elongación foliar, mientras que los limosos presentaron los valores más bajos, probablemente debido a la mayor fijación del fósforo en sus complejos coloidales.

En contraste con la parte aérea, la longitud radicular aumentó de forma progresiva entre 5 y 40 mg L⁻¹, con longitudes que pasaron de aproximadamente 7 cm a valores cercanos a 9,5–10 cm, antes de estabilizarse en 80 mg L⁻¹. Este comportamiento, confirmado por el ANOVA ($p < 0,0001$), indica que la raíz depende estrechamente del P durante la fase temprana de crecimiento, ya que este nutriente es fundamental para la división celular y la producción de ATP, procesos críticos para la exploración del suelo.

La textura ejerció un efecto moderado pero relevante: el suelo limoso presentó las mayores longitudes, seguido del arenoso y, finalmente, del arcilloso. Este patrón coincide con la combinación de una buena retención hídrica sin una fijación excesiva del fósforo, en el caso del limo, frente a la fuerte adsorción del nutriente en suelos arcillosos, que reduce su disponibilidad inmediata para la planta. La raíz respondió especialmente entre 5 y 20 mg L⁻¹, rango donde la prueba de Tukey mostró las diferencias más marcadas.

La biomasa total exhibió una tendencia opuesta: disminuyó de manera sostenida con el incremento del fósforo, alcanzando el valor máximo a 5 mg L⁻¹ (0,964 g) y el mínimo a 80 mg L⁻¹ (0,365 g). Esta tendencia decreciente coincide con la significancia observada para el factor concentración ($p < 0,0001$) y con la ausencia de efectos significativos por textura, lo que sugiere que la disponibilidad de P fue el principal factor limitante para la acumulación de materia seca. El descenso sistemático en biomasa puede asociarse con procesos de toxicidad por fósforo reportados en suelos con alta capacidad de retención, donde la disponibilidad excesiva del nutriente puede interferir con la absorción de otros elementos esenciales (Shen et al., 2011).

La modelación no lineal reforzó estos patrones. El modelo de Bradley describió adecuadamente la caída en longitud foliar y su estabilización. El modelo logístico capturó con claridad la fase de crecimiento radicular y su meseta, así como el descenso progresivo de la

biomasa total, identificando un punto de inflexión entre 27 y 33 mg L⁻¹. Este umbral coincide con el límite a partir del cual las respuestas de crecimiento dejan de ser positivas y comienza una reducción sostenida en la biomasa. Aunque la mayor biomasa se observó en el sustrato limoso, los modelos mostraron que el mejor ajuste estadístico correspondió al sustrato arcilloso, señalando una relación más consistente entre dosis de fósforo y respuesta fisiológica bajo esa textura.

En conjunto, los resultados muestran que el fósforo presenta un margen estrecho de suficiencia, donde pequeñas variaciones en su concentración pueden generar efectos opuestos entre la raíz y la parte aérea. Mientras la raíz se beneficia de incrementos moderados, la longitud foliar y la biomasa total disminuyen ante dosis superiores a 20 mg L⁻¹. Esto resalta la importancia de manejar el fósforo con precisión y considerar la textura del suelo al definir dosis de fertilización, especialmente en suelos finos donde la fijación del nutriente puede alterar su disponibilidad efectiva y generar respuestas contrastantes en los órganos de la planta.

5.1.3. Efecto del nitrógeno (N) en la longitud foliar y la biomasa de arroz

El nitrógeno generó patrones contrastantes en las plántulas de arroz, caracterizados por un aumento significativo en la elongación foliar y radicular, pero acompañado de una disminución marcada en la biomasa total conforme se incrementó su concentración. Este comportamiento revela que, si bien el nitrógeno estimula los procesos de expansión celular en órganos aéreos y subterráneos, su exceso compromete la eficiencia metabólica necesaria para la acumulación de materia seca.

En la longitud foliar, se observó un incremento progresivo y de naturaleza sigmoidea, con incrementos claros entre 10 y 80 mg L⁻¹, hasta alcanzar una meseta fisiológica cercana a los 160 mg L⁻¹. Este patrón coincide con el resultado del ANOVA, que indicó un efecto

significativo del nitrógeno sobre la elongación foliar ($p = 0,033$), así como con la prueba de Tukey, que agrupó las concentraciones más altas ($80\text{--}160 \text{ mg L}^{-1}$) en el nivel superior. Estas tendencias confirman el papel central del nitrógeno en la síntesis de compuestos estructurales y pigmentos fotosintéticos, fundamentales para la expansión foliar (Fageria et al., 2010).

La textura del sustrato no tuvo un efecto significativo ($p = 0,931$), aunque se observaron ligeras tendencias hacia mayores longitudes en suelos limosos y arenosos, sin diferencias estadísticas. Este resultado es coherente con la alta movilidad del N mineral en el suelo, lo que atenúa las diferencias asociadas a la granulometría.

En la longitud radicular, también se presentó un incremento sostenido con el aumento de la concentración de nitrógeno, aunque con mayor sensibilidad a la textura del sustrato. Entre 10 y 80 mg L^{-1} se registró el mayor aumento, pasando de longitudes iniciales entre $4,4$ y $5,7 \text{ cm}$ hasta valores cercanos a $7,0\text{--}8,0 \text{ cm}$, estabilizándose posteriormente en torno a 160 mg L^{-1} . El ANOVA confirmó efectos significativos tanto del nitrógeno ($p = 0,013$) como de la textura ($p = 0,001$), lo que indica que la longitud radicular depende simultáneamente de la disponibilidad del nutriente y de las condiciones físicas del suelo.

El sustrato arcilloso presentó las mayores longitudes radiculares, seguido del limoso y del arenoso. Este orden sugiere que los suelos con mayor retención hídrica y menor frecuencia de lixiviación proporcionan condiciones más favorables para el aprovechamiento del nitrógeno en la rizosfera, facilitando el crecimiento radical. La prueba de Tukey corroboró estas diferencias, ubicando al suelo arcilloso en el grupo superior.

En contraste con las respuestas morfológicas, la biomasa total disminuyó progresivamente con el incremento del nitrógeno, con valores que oscilaron desde aproximadamente $0,018\text{--}0,020 \text{ g}$ en las dosis iniciales hasta valores mínimos de $0,002\text{--}0,003 \text{ g}$ a 160 mg L^{-1} . Sin embargo, el ANOVA no detectó efectos significativos ni para la concentración

($p = 0,29$) ni para la textura del suelo ($p = 0,46$), lo que indica que, aunque la tendencia decreciente fue consistente en términos descriptivos, la variabilidad experimental no permitió establecer diferencias estadísticas. La prueba de Tukey confirmó esta ausencia de significancia, agrupando todas las concentraciones y todas las texturas en un mismo nivel estadístico.

Este comportamiento puede explicarse por la acumulación de formas no estructurales de nitrógeno (NO_3^- , NH_4^+) que, en exceso, promueven estrés osmótico o metabólico y no se traducen en producción de biomasa, coincidiendo con lo descrito por Tilman et al. (2002) y Du et al. (2020) para sistemas con sobreoferta de nitrógeno.

Los modelos no lineales reforzaron estos patrones: el modelo logístico describió con precisión el comportamiento sigmoideo de la longitud foliar y radicular, con umbrales fisiológicos (x_0) entre ~ 20 y 60 mg L^{-1} para la fracción aérea y entre ~ 50 y 60 mg L^{-1} para la fracción subterránea, dependiendo de la textura. Estos valores representan los puntos a partir de los cuales el cultivo alcanza tasas máximas de elongación antes de estabilizarse.

La biomasa se ajustó adecuadamente mediante el modelo de Bradley, que capturó la caída inicial y su estabilización en valores mínimos, con ajustes especialmente robustos en el sustrato arenoso (R^2 ajustado $\approx 0,95$).

En conjunto, los resultados muestran que el nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento vegetativo del arroz, promoviendo aumentos en la longitud foliar y radicular hasta alcanzar límites fisiológicos definidos por la textura y la disponibilidad de agua. Sin embargo, su exceso no se traduce en una mayor acumulación de biomasa, evidenciando una pérdida de eficiencia fisiológica cuando la disponibilidad supera la demanda del cultivo. Esto destaca la importancia de diseñar esquemas de fertilización ajustados a las condiciones edáficas,

especialmente en suelos arenosos donde la respuesta radicular es más limitada y la eficiencia del nitrógeno se reduce por mayor lixiviación.

5.2. Comparación de las cargas nutricionales aplicadas con estándares nacionales e internacionales

El análisis de la eficiencia en la absorción de nutrientes cobra mayor relevancia al contrastar los resultados experimentales con las recomendaciones oficiales de fertilización en arroz. A nivel internacional, instituciones como PhilRice (Filipinas), BIRRI (Bangladés), el Extension Service de Arkansas (EE. UU.) y EMBRAPA/SOSBAI (Brasil) han establecido dosis de referencia adaptadas a sus respectivas condiciones agroecológicas. En Colombia, la Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz) propone guías técnicas basadas en décadas de investigación, que orientan la fertilización en regiones como los Llanos Orientales y otras zonas arroceras del país.

Sin embargo, es importante señalar que estas recomendaciones han sido formuladas para cubrir todo el ciclo del cultivo, con el objetivo de maximizar el rendimiento de grano, y no específicamente para la fase de establecimiento o desarrollo vegetativo temprano. En cambio, este estudio se enfocó exclusivamente en las etapas iniciales del arroz (emergencia y crecimiento vegetativo temprano), por lo que cualquier comparación debe interpretarse dentro de ese marco limitado.

En este contexto, se realizó un ejercicio comparativo entre los resultados obtenidos bajo condiciones controladas y las dosis comúnmente recomendadas. Este contraste no pretende invalidar las recomendaciones oficiales, sino aportar evidencia sobre la eficiencia de uso de nutrientes en fases tempranas, lo que puede ser clave para reducir pérdidas y mejorar la sostenibilidad del manejo agronómico, especialmente en suelos con distintas texturas.

La Tabla 3 resume las recomendaciones de fertilización más utilizadas en diferentes países, expresadas en kilogramos por hectárea de N, P₂O₅ y K₂O, y permite establecer un marco comparativo con los resultados de este estudio. El contraste entre ambos enfoques muestra que, al menos en etapas iniciales y bajo condiciones controladas, se alcanzó saturación fisiológica con dosis significativamente más bajas que las sugeridas por los manuales técnicos:

Para **potasio**, el umbral de respuesta positiva fue de ~25–40 mg/L (10–13 kg/ha), frente a las recomendaciones de 60–80 kg/ha.

En **fósforo**, dosis superiores a 20 mg/L (3–3.5 kg/ha) redujeron el crecimiento, muy por debajo de las 40–60 kg P₂O₅/ha sugeridas.

En **nitrógeno**, se observaron beneficios hasta 160 mg/L (15–21 kg/ha), mientras que las recomendaciones alcanzan hasta 150 kg/ha.

Estos hallazgos indican que las dosis convencionales podrían estar sobredimensionadas para las fases tempranas del cultivo, lo que incrementa el riesgo de pérdidas por lixiviación y una baja eficiencia en el uso de nutrientes. Por tanto, se plantea que una fertilización más ajustada, basada en el tipo de suelo y el estadio de desarrollo del cultivo, es fundamental para avanzar hacia una producción de arroz más sostenible.

Tabla 3

Recomendaciones nacionales e internacionales de fertilización con N, P₂O₅ y K₂O para el cultivo de arroz

País/Institución	Recomendación típica (kg/ha de N–P ₂ O ₅ –K ₂ O)	Observaciones
Colombia (Fedearroz)	N: 120–150 P ₂ O ₅ : 40–60 K ₂ O: 60–80	Basadas en resultados de más de 50 años de investigación. La cartilla resalta que no siempre que se fertiliza se está nutriendo: depende de análisis de suelo, textura y

Filipinas (PhilRice)	Húmeda (WS¹): 90–40–40 Seca (DS²): 120–40–40	<p>régimen de agua. En riego por inundación hay altas pérdidas de N y K por lixiviación, y fijación de P en suelos ácidos (Castilla Lozano & Tirado Ospina, 2018).</p> <p>Esquema general cuando no se usa SSNM³/MOET⁴; fraccionamiento del N entre macollamiento y PI (Javier, 2022).</p> <p>El país opera con la Fertilizer Recommendation Guide (FRG) y herramientas SSNM/RCM⁵; tasas varían por ecosistema (Boro/Aus/Aman) (Miah et al., 2025).</p>
Bangladés (BARC/BRI)	150–90–60 (N–P ₂ O ₅ –K ₂ O); variantes por zona/variedad	<p>Guías basadas en análisis de suelo; N se determina con N-STaR (preflood + ajustes), no una dosis única (Hardke et al., 2022).</p>
EE. UU. (Arkansas Extension)	P₂O₅: 0–70 lb/ac (≈0–79 kg/ha) según P Mehlich-3 • K₂O: 0–120 lb/ac (≈0–135 kg/ha) según K Mehlich-3 • N: vía N-STaR ⁶ (no tasa fija; depende del N del perfil)	<p>Documentos remarcan evitar “recetas estándar” y calibrar NPK a sitio y sistema (SIPA⁹/RS¹⁰); prácticas de colocación y fraccionamiento (Barbosa Filho & Fageria, 2013).</p>
Brasil (EMBRAPA ⁷ /SOSBAI ⁸ , arroz irrigado)	<p>Tablas por estado/ambiente; enfoque en calibración local y manejo para eficiencia; (las tasas se ajustan por análisis y sistema)</p> <p>No se establece una “dosis única”; se calculan tasas específicas por sitio (N, P, K) en función de</p>	<p>SSNM ha mostrado mejorar rendimiento e ingreso vs. recomendaciones uniformes (Buresh et al., 2019).</p>
Enfoque IRR ¹¹ (SSNM/RCM)	<p>No se establece una “dosis única”; se calculan tasas específicas por sitio (N, P, K) en función de</p>	<p>SSNM ha mostrado mejorar rendimiento e ingreso vs. recomendaciones uniformes (Buresh et al., 2019).</p>

¹ **WS (Wet Season):** temporada lluviosa o húmeda.

² **DS (Dry Season):** temporada seca. En países tropicales como Filipinas o Bangladés las recomendaciones de fertilización varían en función de la estación.

³ **SSNM (Site-Specific Nutrient Management):** manejo de nutrientes específico por sitio. Este enfoque no se basa en una dosis fija, sino que ajusta la aplicación de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) según los análisis de suelo, el rendimiento esperado y las condiciones locales. Fue desarrollado por el International Rice Research Institute (IRRI).

⁴ **MOET (Minus-One Element Technique):** técnica diagnóstica en macetas que consiste en la omisión secuencial de un nutriente (–N, –P, –K, etc.) para identificar deficiencias nutricionales en el cultivo.

⁵ **RCM (Rice Crop Manager):** herramienta digital (disponible como aplicación móvil y plataforma web) desarrollada por el IRRI, que aplica el enfoque SSNM para generar recomendaciones personalizadas de fertilización y manejo del cultivo.

⁶ **N-STaR (Nitrogen Soil Test for Rice):** método utilizado en Estados Unidos (Arkansas, Luisiana) para la recomendación de nitrógeno. Se basa en la estimación del contenido de nitrógeno mineralizable en el suelo (0–30 cm de profundidad), con el fin de ajustar la dosis antes del primer riego por inundación y evitar aplicaciones excesivas.

⁷ **EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária):** agencia pública de investigación agropecuaria en Brasil.

⁸ **SOSBAI (Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado):** sociedad científica responsable de la publicación de las recomendaciones técnicas para el cultivo de arroz en el sur de Brasil.

⁹ **SIPA (Sistema Integrado de Produção Agropecuária):** sistema brasileño de producción agropecuaria basado en la integración de actividades agrícolas y pecuarias.

¹⁰ **RS:** sigla correspondiente al estado de Rio Grande do Sul, principal región productora de arroz en Brasil. En este estado, la EMBRAPA y la SOSBAI elaboran manuales técnicos para el manejo del cultivo de arroz irrigado.

¹¹ **IRRI (International Rice Research Institute):** instituto internacional con sede en Los Baños, Filipinas, considerado la

principal organización mundial dedicada a la investigación del arroz.

rendimientos meta, residuos
y suelo

Además de revisar las recomendaciones en Colombia y otros países productores de arroz, se compararon las dosis máximas aplicadas en este estudio (expresadas en N, P y K elementales) con los valores de referencia nacionales e internacionales. En la Tabla 4 se presenta dicha comparación, donde los valores de fósforo y potasio fueron convertidos a sus equivalentes en P_2O_5 y K_2O para asegurar la correspondencia con las guías técnicas, manteniendo al mismo tiempo la expresión elemental de los resultados experimentales.

Tabla 4

Comparación entre las dosis máximas aplicadas en este estudio y las recomendaciones nacionales e internacionales de fertilización para arroz.

Nutriente	Dosis máxima aplicada (kg/ha, elemento)	Equivalente en óxido (kg/ha)	Colombia (Fedearroz) (Castilla Lozano & Tirado Ospina, 2018)	Filipinas (PhilRice) (Javier, 2022)	Bangladés (BRRI) (Miah et al., 2025)	EE. UU. (Arkansas) (Hardke et al., 2022)	Brasil (EMBRAPA/SO SBAI) (Barbosa Filho & Fageria, 2013)
N	21.1 N		120–150 N	90–120 N	90–150 N	100–150 N	90–150 N
P	12.9 P	29.5 P_2O_5	40–60 P_2O_5	40 P_2O_5	60–90 P_2O_5	0–79 P_2O_5	40–60 P_2O_5
K	26.9 K	32.3 K_2O	60–80 K_2O	40 K_2O	60 K_2O	0–135 K_2O	60–90 K_2O

Nota: Las concentraciones experimentales se expresaron en N, P y K elementales. Para efectos de comparación con las recomendaciones técnicas, los valores de P y K se convirtieron a P_2O_5 y K_2O usando factores de 2.29 y 1.20, respectivamente.

Los experimentos evidenciaron que la biomasa de las plántulas de arroz aumentó significativamente con las dosis crecientes de potasio (K) y nitrógeno (N), hasta alcanzar un umbral de saturación comprendido entre 25 y 40 mg L⁻¹ (equivalentes a aproximadamente 6–13 kg/ha). A partir de este rango, no se registraron beneficios adicionales, e incluso se observó inhibición en la elongación radicular. En contraste, las dosis elevadas de fósforo (≥ 40 mg L⁻¹, ≈ 6 –13 kg/ha) redujeron la longitud foliar y la biomasa total, confirmando que los excesos de este nutriente generan efectos tóxicos y desbalances nutricionales.

Al expresar estas concentraciones en unidades equivalentes de campo (kg/ha), se observa que los umbrales fisiológicos determinados en condiciones controladas son considerablemente inferiores a las dosis comúnmente recomendadas por las instituciones agrícolas. En Colombia, por ejemplo, Fedearroz sugiere aplicaciones de 120–150 kg/ha de N, 40–60 kg/ha de P_2O_5 y 60–80 kg/ha de K_2O , valores que se sitúan dentro del rango superior de los tratamientos evaluados. De manera similar, en Filipinas (PhilRice) y Bangladés (BRRI) se recomiendan entre 90–150 kg N/ha y 40–60 kg P_2O_5 /ha, mientras que en Estados Unidos (Arkansas) las sugerencias alcanzan hasta 135 kg K_2O /ha, según los resultados del análisis de suelo.

El contraste entre estos esquemas y los resultados experimentales revela que las dosis moderadas (20–40 mg L^{-1} , \approx 5–13 kg/ha) optimizaron el crecimiento en biomasa y la longitud de hojas y raíces, mientras que las dosis más elevadas, comparables a las prácticas convencionales, no produjeron mejoras proporcionales. En algunos casos se observó incluso un efecto de saturación o reducción en las variables morfofisiológicas, especialmente en los tratamientos con fósforo. Estos resultados sugieren que las recomendaciones generalizadas podrían inducir sobrefertilización, particularmente en suelos de baja capacidad de retención, ocasionando pérdidas de nutrientes por lixiviación y reduciendo la eficiencia de uso.

En términos edáficos, los resultados confirman la necesidad de ajustar las dosis de fertilización a las características específicas del suelo. En suelos arenosos, dosis relativamente bajas ya generan respuestas fisiológicas positivas, mientras que los excesos se pierden fácilmente por lixiviación. En suelos arcillosos o limosos, por el contrario, el fósforo tiende a inmovilizarse, lo que explica la menor respuesta en biomasa observada ante dosis elevadas.

Los datos experimentales indican que incluso con dosis máximas de 25–27 kg/ha de potasio se aplicó menos de la mitad de la dosis convencional utilizada en Colombia y menos de una quinta parte de la recomendada en Estados Unidos. Aun así, se obtuvieron incrementos notables en biomasa y longitud foliar hasta un umbral de 25–40 mg L^{-1} (\approx 10–13 kg/ha), más

allá del cual no se registraron mejoras adicionales. Ello demuestra que la eficiencia de uso del potasio en condiciones controladas fue elevada, ya que con dosis significativamente menores que las oficiales se alcanzó la saturación fisiológica. Aplicaciones superiores a 25–27 kg/ha probablemente no incrementarían la biomasa y, en condiciones de campo, podrían derivar en pérdidas por lixiviación en suelos arenosos o fijación en suelos arcillosos. Este contraste con las recomendaciones de Fedearroz y de otras instituciones internacionales refuerza la hipótesis de una posible sobre-fertilización en esquemas convencionales.

En el caso del fósforo, incluso con la dosis máxima (~13 kg/ha, equivalente a ~29,5 kg P₂O₅/ha) se aplicó apenas un 20–30 % de lo recomendado por Fedearroz, y una proporción aún menor en comparación con Asia o Estados Unidos. Sin embargo, los resultados demostraron que a mayores dosis de P la longitud foliar y la biomasa disminuyeron, confirmando un efecto tóxico o de desbalance nutricional. En consecuencia, en condiciones de maceta y suelos con alta capacidad de retención, dosis moderadas (<10 kg/ha) son suficientes para cubrir la demanda inicial del cultivo. Esto sugiere que las recomendaciones convencionales podrían estar sobreestimadas para suelos de textura fina, en los cuales el fósforo tiende a inmovilizarse y no siempre se encuentra disponible para la planta.

En cuanto al nitrógeno, las dosis aplicadas fueron entre seis y diez veces inferiores a las recomendadas internacionalmente. A pesar de ello, las plántulas mostraron incrementos notables en biomasa y longitud foliar hasta alcanzar un umbral de 160 mg L⁻¹ (≈15–21 kg/ha), a partir del cual la respuesta se estabilizó. Estos resultados evidencian que dosis reducidas pueden satisfacer la demanda inicial del cultivo, lo que sugiere que las recomendaciones de campo podrían estar sobredimensionadas si no se ajustan a la textura del suelo y a las condiciones locales.

En síntesis, la comparación general demuestra que las dosis experimentales — considerablemente inferiores a las convencionales— fueron suficientes para alcanzar la saturación fisiológica en biomasa y longitud foliar de las plántulas de arroz. Este hallazgo pone

de manifiesto que las recomendaciones generalizadas (60–150 kg/ha) tienden a inducir sobrefertilización, lo cual no solo reduce la eficiencia económica del fertilizante, sino que también incrementa los riesgos de lixiviación y contaminación ambiental, especialmente en suelos arenosos. En consecuencia, los resultados respaldan la necesidad de adoptar estrategias de fertilización específica por sitio (SSNM, *Site-Specific Nutrient Management*), que permitan optimizar la productividad y la sostenibilidad del cultivo mediante el ajuste preciso de las dosis a las condiciones edáficas locales.

Conclusiones

El potasio (K^+) generó respuestas contrastantes: redujo significativamente la longitud radicular conforme aumentó su concentración, pero estimuló la acumulación de biomasa hasta un umbral cercano a 40 mg L^{-1} , punto a partir del cual el crecimiento dejó de mejorar. Estos resultados indican que dosis moderadas son suficientes para promover el desarrollo inicial, mientras que concentraciones elevadas comprometen la arquitectura radicular sin aportar beneficios adicionales.

El fósforo (P) presentó el margen más estrecho entre suficiencia y exceso. La longitud foliar y la biomasa disminuyeron desde 20 mg L^{-1} , mientras que la longitud radicular aumentó hasta estabilizarse en niveles altos, reflejando una mayor sensibilidad del tejido aéreo frente al exceso del nutriente. Estos patrones confirman la necesidad de manejar el fósforo con precisión y en función de la textura, particularmente en suelos con alta capacidad de adsorción.

El nitrógeno (N) provocó incrementos significativos en la longitud foliar y radicular hasta alcanzar umbrales de saturación, pero no generó aumentos en biomasa; por el contrario, las tendencias descriptivas mostraron reducciones marcadas a altas dosis, aunque sin significancia estadística. Esto evidencia un desbalance fisiológico entre elongación y acumulación de materia seca bajo exceso de nitrógeno y resalta la importancia de ajustar las dosis en función del tipo de suelo y la etapa fenológica.

La textura del suelo moduló todas las respuestas fisiológicas: los suelos arenosos favorecieron la elongación radicular y foliar, mientras que los limosos y arcillosos promovieron una mayor acumulación de biomasa debido a su mayor retención hídrica y de nutrientes. Esto

confirma que la eficiencia nutricional depende no sólo de la dosis aplicada, sino también de las propiedades físicas del sustrato.

Los modelos no lineales (Bradley y logístico) permitieron identificar umbrales fisiológicos y describir con precisión las fases de estimulación, saturación e inhibición. Su utilidad radica en traducir los patrones morfofisiológicos en criterios cuantitativos para la toma de decisiones en fertilización.

En conjunto, los resultados indican que, en etapas tempranas y bajo condiciones controladas, las necesidades reales del cultivo son inferiores a las dosis tradicionalmente recomendadas para el ciclo completo. Esto respalda el enfoque de manejo específico por sitio (SSNM), orientado a optimizar la eficiencia en el uso de nutrientes, reducir pérdidas y ajustar la fertilización según la textura del suelo y la fase de desarrollo.

Bibliografía

- Acosta Bohórquez, A. F. (2021). Estudio teórico de las afectaciones y soluciones de contaminación de fuentes hídricas por exceso de nitrógeno debido a operación de cultivos de arroz en Casanare, Colombia [Thesis]. Universidad Abierta y a Distancia (UNAD).
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2020). Agroecology: Challenges and opportunities for farming in the Anthropocene. *International journal of agriculture and natural resources*, 47(3), 204-215.
<https://doi.org/10.7764/ijanr.v47i3.2281>
- Angulo Sanchez, J. J. (2023). Evaluación del rendimiento sostenible de producción de arroz bajo dos métodos. Universidad Abierta y a Distancia (UNAD).
- Barbosa Filho, M. P., & Fageria, N. K. (2013). 500 Perguntas 500 Respostas – Arroz (Embrapa Arroz e Feijão (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária)). EMBRAPA.
- Bautista, J. D., & Aguilera, F. (2023). Análisis de la sostenibilidad de los sistemas de producción de arroz en Colombia: Una aproximación metodológica multicriterio. Universidad Nacional de Colombia.
- Brandeberry, L. (2022, junio 14). Rice Production Workshop Manual | Agronomy. <https://agronomy-rice.ucdavis.edu/rice-production-workshop-manual>
- Buresh, R. J., Castillo, R. L., Dela Torre, J. C., Laureles, E. V., Samson, M. I., Sinohin, P. J., & Guerra, M. (2019). Site-specific nutrient management for rice in the Philippines: Calculation of field-specific fertilizer requirements by Rice Crop Manager. *Field Crops Research*, 239, 56-70.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.05.013>
- Carranza-Patiño, M., Aragundi-Sabando, L., Macias-Barrera, K., Paredes-Sarabia, E., & Villegas-Ramírez, A. (2024). Conservación y Manejo Sostenible del Suelo en la Agricultura: Una Revisión Sistemática de Prácticas Tradicionales y Modernas. *Código Científico Revista de Investigación*, 5(E3), 1-28. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/ne3/303>
- Carrillo, O. S. P., Torres, H. F., Torres-Rodríguez, G. A., & Trujillo-González, J. M. (2020). Impactos del cambio climático sobre los rendimientos del arroz (*Oryza sativa* L.) en la zona Llanos, Colombia.
- Castilla Lozano, L. A., & Tirado Ospina, Y. C. (2018). Guía para la fertilización en el cultivo del arroz (FEDEARROZ – Fondo Nacional del Arroz). Mónica Vera, Diseñadora Gráfica.

- Cornelissen, J. H. C., Lavorel, S., Garnier, E., Díaz, S., Buchmann, N., Gurvich, D. E., Reich, P. B., Steege, H. T., Morgan, H. D., Heijden, M. G. A. V. D., Pausas, J. G., & Poorter, H. (2003). A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 51(4), 335-380. <https://doi.org/10.1071/BT02124>
- Degiovanni, V., Martínez R., C. P., & Motta O., F. (2010). Producción eco-eficiente del arroz en América Latina. Tomo I: Capítulos 1-24. En Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) (pp. 1-450).
- Domínguez-Vento, C. (2025). Approaches to Efficient Water Management and Use in Rice Cultivation. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 34, 1-12.
- Dou, F., Soriano, J., Tabien, R. E., & Chen, K. (2016). Soil Texture and Cultivar Effects on Rice (*Oryza sativa*, L.) Grain Yield, Yield Components and Water Productivity in Three Water Regimes. *PLOS ONE*, 11(3), e0150549. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150549>
- Du, J., Shen, T., Xiong, Q., Zhu, C., Peng, X., He, X., Fu, J., Ouyang, L., Bian, J., Hu, L., Sun, X., Zhou, D., He, H., Zhong, L., & Chen, X. (2020). Combined proteomics, metabolomics and physiological analyses of rice growth and grain yield with heavy nitrogen application before and after drought. *BMC Plant Biology*, 20(1), 556. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02772-y>
- Du, M., Zhang, W., Gao, J., Liu, M., Zhou, Y., He, D., Zhao, Y., & Liu, S. (2022). Improvement of Root Characteristics Due to Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Interactions Increases Rice (*Oryza sativa* L.) Yield and Nitrogen Use Efficiency. *Agronomy*, 12(1), 23. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010023>
- Epstein, E., & Bloom, A. J. (2005). *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives* (Second Edition). Sinauer Associates.
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Jones, C. A. (2010). *Growth and Mineral Nutrition of Field Crops* (3rd. Edición). CRC press.
- Fageria, N. K., Slaton, N. A., & Baligar, V. C. (2003). Nutrient Management for Improving Lowland Rice Productivity and Sustainability. En *Advances in Agronomy* (Vol. 80, pp. 63-152). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)80003-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)80003-2)

- Fedearroz. (2021). Informe de gestión Fondo Nacional del Arroz. Fondo Nacional del Arroz - Fedearroz.
https://fedearroz-website.s3.amazonaws.com/media/documents/INFORME_DE_GESTION_VIGENCIA_2021_FN A.pdf
- Fukagawa, N. K., & Ziska, L. H. (2019). Rice: Importance for Global Nutrition. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, 65(Supplement). <https://doi.org/10.3177/jnsv.65.S2>
- Gao, D., Ran, C., Dang, K., Wang, X., Zhang, Y., Geng, Y., Liu, S., Guan, Z., Guo, L., & Shao, X. (2023). Effect of Phosphorus, Iron, Zinc, and Their Combined Deficiencies on Photosynthetic Characteristics of Rice (*Oryza sativa* L.) Seedlings. *Agronomy*, 13(6), 1657.
<https://doi.org/10.3390/agronomy13061657>
- Gerencia Corporativa de Analítica y Estudios Económicos. (2022). Análisis de Producto: Arroz (p. 42). Bolsa Mercantil de Colombia.
- Gómez, J. (2010). Manejo del suelo en la Altillanura de los Llanos Orientales de Colombia. En *Producción eco-eficiente del arroz en América Latina* (pp. 279-305).
- Gupta, B., & Huang, B. (2014). Mechanism of Salinity Tolerance in Plants: Physiological, Biochemical, and Molecular Characterization. *International Journal of Genomics*, 2014, 1-18.
<https://doi.org/10.1155/2014/701596>
- Hardke, J., Barber, T., Butts, T., Hamilton, M., Henry, C., Mazzanti, R., Norsworth, J., Roberts, T., & Wamishe, Y. (2022). Extension RICE. University of Arkansas System Division of Agriculture, Cooperative Extension Service. <https://www.uaex.uada.edu/farm-ranch/crops-commercial-horticulture/rice/2022%20Rice%20Management%20Guide.pdf>
- Hillel, D., & Warrick, A. W. (1998). *Environmental soil physics* (Nachdr. der Ausg. 1998). AP, Acad. Press.
- Hurlbert, S. H. (1984). Pseudoreplication and the Design of Ecological Field Experiments. *Ecological Monographs*, 54(2), 187-211. <https://doi.org/10.2307/1942661>
- IPCC. (2021). Special Report on Climate Change and Land. *Climate Change and Land*.
<https://www.ipcc.ch/srccl/>

- Javier, E. F. (2022). Organic-based Nutrient Management for Rice Production (p. 34) [Manual]. Philippine Rice Research Institute (PhilRice). <https://www.philrice.gov.ph/wp-content/uploads/2022/12/Organic-based-Nutrient-Management-for-Rice-Production.pdf>
- Julia, C. C., Rose, T. J., Pariasca-Tanaka, J., Jeong, K., Matsuda, T., & Wissuwa, M. (2018). Phosphorus uptake commences at the earliest stages of seedling development in rice | Journal of Experimental Botany | Oxford Academic. *Journal of Experimental Botany*, 69(21), 5233-5240. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery267>
- Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate Stability and Size Distribution. In *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods (Second Edition)*, pp. 425-442. Soil Science Society of America.
- Linscombe, S. (2016, enero 13). Understanding of Growth Stages is Critical in Rice Production. LSU AgCenter. https://www.lsuagcenter.com/portals/our_offices/research_stations/rice/features/publications/understanding-of-growth-stages-is-critical-in-rice-production
- Liu, Y., Gao, J., Zhao, Y., Fu, Y., Yan, B., Wan, X., Cheng, G., & Zhang, W. (2024). Effects of different phosphorus and potassium supply on the root architecture, phosphorus and potassium uptake, and utilization efficiency of hydroponic rice. *Scientific Reports*, 14(1), 21178. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72287-1>
- Meng, F., Xiang, D., Zhu, J., Li, Y., & Mao, C. (2019). Molecular Mechanisms of Root Development in Rice. *Rice*, 12(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s12284-018-0262-x>
- Miah, Md. M. U., Jahiruddin, M., Islam, M. F., & Razia, S. (2025). Fertilizer Recommendation Guide—2005 (Vol. 45). Bangladesh Agricultural Research Council (BARC).
- Mohd Zain, N. A., & Ismail, M. R. (2016). Effects of potassium rates and types on growth, leaf gas exchange and biochemical changes in rice (*Oryza sativa*) planted under cyclic water stress. *Agricultural Water Management*, 164, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.022>
- Montgomery, D. C. (2020). *Design and Analysis of Experiments (10th ed.)*. Hoboken, New Jersey, USA.
- Mostofa, M. G., Rahman, Md. M., Ghosh, T. K., Kabir, A. H., Abdelrahman, M., Rahman Khan, Md. A., Mochida, K., & Tran, L.-S. P. (2022). Potassium in plant physiological adaptation to abiotic

- stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 186, 279-289.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.07.011>
- Navea, I. P., Yang, S., Tolangi, P., Sumabat, R. M., Zhang, W., & Chin, J. H. (2024). Enhancement of rice traits for the maintenance of the phosphorus balance between rice plants and the soil. *Current Plant Biology*, 38, 100332. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2024.100332>
- Ranjan, K. R., & Singh, Y. V. (2021). Effect of Potassium Fertilization on Growth and Yield Attributes of Rice (*Oryza sativa* L.) Crop in an Inceptisol. *Journal of Scientific Research and Reports*, 52-57. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2021/v27i230358>
- Sack, L., & Scoffoni, C. (2013). Leaf venation: Structure, function, development, evolution, ecology and applications in the past, present and future. *New Phytologist*, 198(4), 983-1000.
<https://doi.org/10.1111/nph.12253>
- Salter, P. J., & Haworth, F. (1961). THE AVAILABLE-WATER CAPACITY OF A ARENOSO LOAM SOIL: I. A CRITICAL COMPARISON OF METHODS OF DETERMINING THE MOISTURE CONTENT OF SOIL AT FIELD CAPACITY AND AT THE PERMANENT WILTING PERCENTAGE. *Journal of Soil Science*, 12(2), 326-334. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1961.tb00922.x>
- Sandhu, N., Subedi, S. R., Singh, V. K., Sinha, P., Kumar, S., Singh, S. P., Ghimire, S. K., Pandey, M., Yadaw, R. B., Varshney, R. K., & Kumar, A. (2019). Deciphering the genetic basis of root morphology, nutrient uptake, yield, and yield-related traits in rice under dry direct-seeded cultivation systems. *Scientific Reports*, 9(1), 9334. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45770-3>
- Shen, J., Yuan, L., Zhang, J., Li, H., Bai, Z., Chen, X., Zhang, W., & Zhang, F. (2011). Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. *Plant Physiology*, 156(3), 997-1005.
<https://doi.org/10.1104/pp.111.175232>
- Solano Guzmán, C. J. (2016). Estimación preliminar de cargas de nutrientes y sedimentos debido a cambios en el uso del suelo, considerando la implementación de un modelo SWAT. Caso de estudio río Teusacá [Thesis]. Universidad de Los Andes.
- Sun, Z., Hu, Y., Shi, L., Li, G., Pang, Z., Liu, S., Chen, Y., & Jia, B. (2022). Effects of biochar on soil chemical properties: A global meta-analysis of agricultural soil. *Plant, Soil and Environment*, 68(6), 272-289. <https://doi.org/10.17221/522/2021-PSE>

- Tagliapietra, B. L., Soares, C. F., & Clerici, M. T. P. S. (2024). Rice (*Oryza sativa* L.) and its products for human consumption: General characteristics, nutritional properties, and types of processing. *Food Science and Technology*, 44. <https://doi.org/10.5327/fst.00292>
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>
- Tuong, T. P., & Bouman, B. A. M. (2003). Rice production in water-scarce environments. In *Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement* (1.^a ed., pp. 53-67). CABI Publishing. <https://doi.org/10.1079/9780851996691.0053>
- UC Cooperative Extension. (2023). *California Rice Production Workshop 2023: Rice Growth & Development* (2023.^a ed.). University of California Agriculture and Natural Resources.
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson Education Limited.
- Xu, M., Gao, P., Yang, Z., Su, L., Wu, J., Yang, G., Zhang, X., Ma, J., Peng, H., & Xiao, Y. (2019). Biochar impacts on phosphorus cycling in rice ecosystem. *Chemosphere*, 225, 311-319. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.069>
- Ye, C., Zheng, G., Tao, Y., Xu, Y., Chu, G., Xu, C., Chen, S., Liu, Y., Zhang, X., & Wang, D. (2024). Effect of Soil Texture on Soil Nutrient Status and Rice Nutrient Absorption in Paddy Soils. *Agronomy*, 14(6), 1339. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061339>

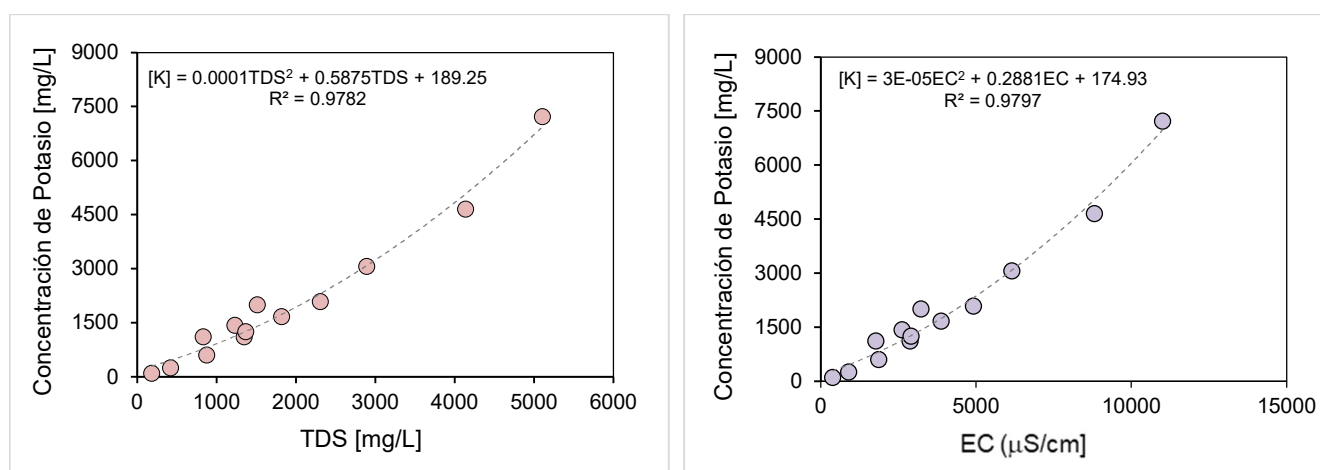
Anexos

Anexo 1

Curvas de calibración de nutrientes: Este anexo presenta las curvas de calibración concentración vs. conductividad eléctrica (EC) y sólidos disueltos totales (TDS) elaboradas para cada nutriente evaluado, utilizando el medidor multiparámetro portátil Hanna Instruments HI99300 previamente calibrado. Estas curvas permitieron validar las concentraciones preparadas en las soluciones nutritivas y estimar de forma indirecta los niveles en los lixiviados.

Tabla A1.

Curva de calibración concentración del potasio vs. conductividad eléctrica (EC) y sólidos disueltos totales (TDS).

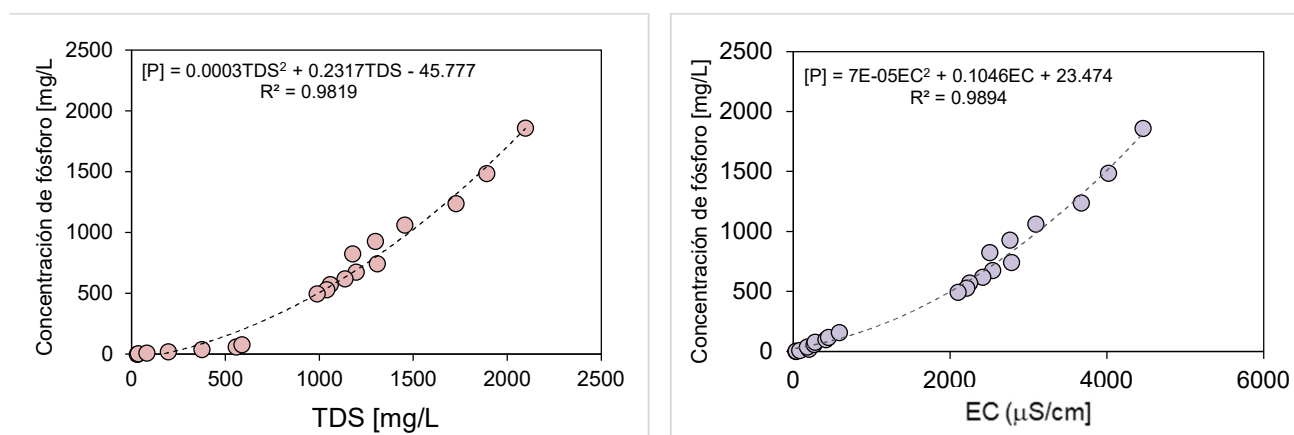


Nota. La Figura A1 presenta las curvas de calibración entre la concentración de potasio (K^+) y dos parámetros fisicoquímicos de la solución: sólidos disueltos totales (TDS) y conductividad eléctrica (EC). Ambas relaciones muestran un ajuste polinómico de segundo grado con altos coeficientes de determinación ($R^2 \approx 0.88$), lo que indica una fuerte correlación entre la concentración de K^+ y las variables medidas. Estas curvas se utilizaron para verificar la linealidad y exactitud de las mediciones de concentración del nutriente durante el experimento.

Los datos son originales, obtenidos en el presente estudio, y las gráficas fueron generadas en Excel®.

Tabla A2

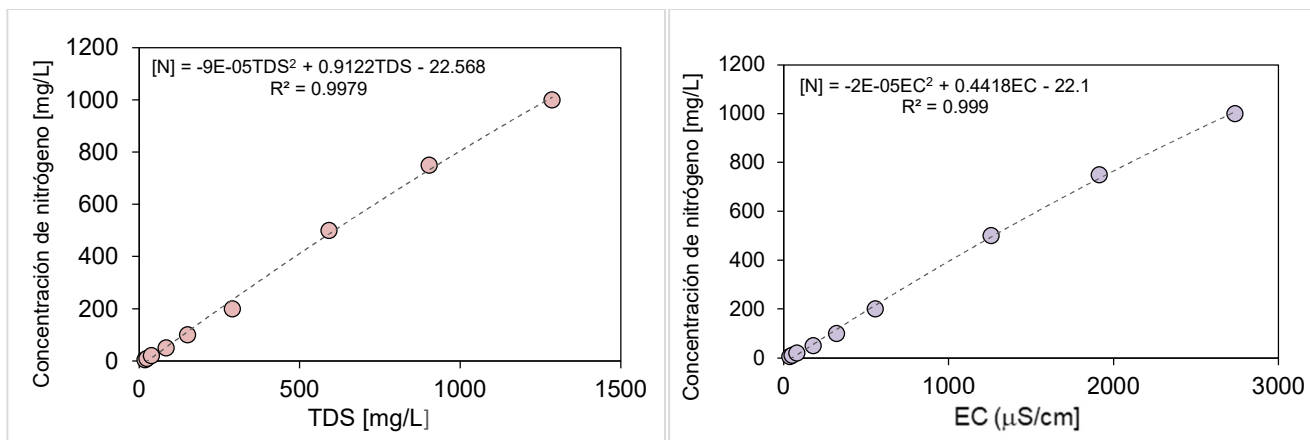
Curva de calibración concentración del fósforo vs. conductividad eléctrica (EC) y sólidos disueltos totales (TDS).



Nota. La Figura A2 muestra las curvas de calibración entre la concentración de fósforo (P) y dos parámetros fisicoquímicos de la solución: sólidos disueltos totales (TDS) y conductividad eléctrica (EC). En ambos casos, las curvas presentan un ajuste polinómico de segundo grado con coeficientes de determinación elevados ($R^2 = 0.9819$ y $R^2 = 0.9894$, respectivamente), lo que evidencia una fuerte correlación entre la concentración de fósforo y las mediciones indirectas de TDS y EC. Estas curvas se emplearon para validar la precisión y linealidad de las mediciones de concentración de fósforo durante el experimento. Los datos son originales, obtenidos en el presente estudio, y las gráficas fueron generadas en Excel®.

Tabla A3

Curva de calibración concentración del nitrógeno vs. conductividad eléctrica (EC) y sólidos disueltos totales (TDS)



Nota. La Figura A2 presenta las curvas de calibración entre la concentración de nitrógeno (N) y dos parámetros fisicoquímicos de la solución: sólidos disueltos totales (TDS) y conductividad eléctrica (EC).

Ambas relaciones muestran un ajuste polinómico de segundo grado con altos coeficientes de determinación ($R^2 = 0.9879$ y $R^2 = 0.989$, respectivamente), lo que indica una correlación casi lineal y altamente confiable entre la concentración de nitrógeno y los valores de TDS y EC. Estas curvas fueron utilizadas para verificar la precisión y linealidad de las mediciones de concentración de nitrógeno en las soluciones experimentales. Los datos son originales, obtenidos en el presente estudio, y las gráficas fueron generadas en Excel®.

Anexo 2

Datos experimentales de las respuestas morfofisiológicas tempranas del arroz según concentración de nutrientes y textura del sustrato

Tabla A 4

Longitud radicular y biomasa del arroz en tres texturas de sustrato bajo diferentes concentraciones de potasio

Concentración de potasio (mg L ⁻¹)	Longitud Radicular						Biomasa Total		
	Promedio	Desvest	Promedio	Desvest	Promedio	Desvest	Promedio	Promedio	Promedio
	Arenoso		Arcilloso		Limoso		Arenoso	Arcilloso	Limoso
5	13,32	1,04547	11,62	0,38633	9,06	0,53572	0,031	0,0412	0,048
10	7,74	0,42367	6,52	0,49295	5,16	0,57944	0,0322	0,056	0,0538
20	4,26	0,47513	2,54	0,19875	2,72	0,22749	0,0562	0,0702	0,0974
40	2,93333	0,43012	2,03182	0,32747	2,07931	0,23881	0,08958	0,09422	0,10835

Tabla A 5

Longitud de hoja, longitud radicular y biomasa del arroz en tres texturas de sustrato bajo diferentes concentraciones de fósforo

Concentración de potasio (mg L ⁻¹)	Longitud de Hoja						Longitud Radicular						Biomasa Total		
	Promedio	Desvest	Promedio	Desvest	Promedio	Desvest	Promedio	Desvest	Promedio	Desvest	Promedio	Desvest	Promedio	Promedio	Promedio
	Arenoso		Arcilloso		Limoso		Arenoso		Arcilloso		Limoso		Arenoso	Arcilloso	Limoso
5	9,96667	1,89561	8,92667	2,03311	8,35385	2,64657	7,1	0,51257	6,214	1,1316	7,6213	1,50436	0,9478	1,01655	1,32329
10	9,33333	2,05795	8,01833	1,86667	7,19167	1,96906	7,542	0,99029	8,357	1,22594	8,45833	1,81327	1,02897	0,93334	0,98453

20	9,05455	1,34638	7,79167	2,03892	7,15	1,41646	9,06364	1,05197	8,68333	1,5559	8,74167	1,50052	0,67319	1,01946	0,70823
40	8,13077	2,61578	7,68111	1,77373	6,8	1,71994	9,70769	1,17588	9,21111	1,23704	9,83333	1,66629	1,30789	0,88686	0,85997
80	8,12	3,06369	7,62222	3,14832	6,75556	1,54848	9,36	1,32606	9,5125	1,01785	10,0012	0,84068	1,53185	1,57416	0,77424

Tabla A 6

Longitud de hoja, longitud radicular y biomasa del arroz en tres texturas de sustrato bajo diferentes concentraciones de nitrógeno

Concentración de potasio (mg L ⁻¹)	Longitud de Hoja						Longitud Radicular						Biomasa Total		
	Promedio	Desvest	Promedio	Desvest	Promedio	Desvest	Promedio	Desvest	Promedio	Desvest	Promedio	Desvest	Promedio	Promedio	Promedio
	Arenoso		Arcilloso		Limoso		Arenoso		Arcilloso		Limoso		Arenoso	Arcilloso	Limoso
10	7,3	0,40927	8,36667	1,23477	10,36667	1,40208	2,9975	1,52069	5,6	0,47749	4,76667	0,11547	0,011	0,02	0,019
20	7,4	1,88613	9,84	0,7775	10,65	1,66068	4,3302	0,52042	6,13333	0,89703	5,6875	0,62189	0,008	0,011	0,014
40	9,175	1,79677	12,125	1,73271	11,21429	1,94346	4,3625	0,79235	7,375	0,94373	5,5	1,13944	0,006	0,013	0,011
80	12,85	2,40607	13	--	12,76	1,93087	5,392	0,52678	9,5	0,00105	6,3	1,29422	0,0014	0,004	0,0112
160	14,64	2,27461	12,5	--	13	2,48328	5,91333	0,874	10,415	0,00229	7	1,25831	0,00107	0,003	0,00182

Anexo 3

Resultados de los análisis de varianza (ANOVA)

Tabla A 7

ANOVA para la longitud de la raíz en función de la concentración de potasio y la textura del suelo

1 ANOVATwoWay (7/08/2025 15:56:06)

- Notes
- Input Data
- Descriptive Statistics
 - Q

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
Sandy	26	6,21923	4,09898	0,80388	16,80162	0	26
Clayey	37	4,0027	3,47159	0,57073	12,05194	0	37
Silty	44	3,29545	2,38824	0,36004	5,7037	0	44
 - R

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
5	15	11,33333	2,2433	0,57922	5,03238	0	15
10	15	6,47333	1,43401	0,37026	2,05638	0	15
20	15	3,17333	1,00033	0,25828	1,00067	0	15
40	62	2,25968	0,80316	0,102	0,64507	0	62
 - Overall

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
	107	4,25047	3,42349	0,33096	11,72026	0	107
- ANOVA
 - Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	P Value
Q	2	57,10538	28,55269	30,19841	<0.0001
R	3	1003,67339	334,5578	353,84103	<0.0001
Model	5	1146,85166	229,37033	242,59077	<0.0001
Error	101	95,49582	0,9455		
Corrected Total	106	1242,34748			

At the 0.05 level, the population means of Q are significantly different.
At the 0.05 level, the population means of R are significantly different.
 - Means Comparisons
 - Tukey Test
 - Q

	Mean	Groups
Sandy	6,21923	A
Clayey	4,0027	B
Silty	3,29545	C

Means that do not share a letter are significantly different.
 - R

	Mean	Groups
5	11,33333	A
10	6,47333	B
20	3,17333	C
40	2,25968	D

Tabla A 8

ANOVA para la biomasa en función de la concentración de potasio y la textura del suelo

1 ANOVATwoWay (7/08/2025 16:16:21)

+ Notes

+ Input Data

- Descriptive Statistics

- Q

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
Sandy	26	0,06469	0,02895	0,01182	8,37914E-4	20	6
Clayey	37	0,08141	0,02157	0,00719	4,6513E-4	28	9
Silty	44	0,09437	0,02556	0,00852	6,53562E-4	35	9

- R

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
5	15	0,04007	0,00856	0,00494	7,32133E-5	12	3
10	15	0,04733	0,01315	0,00759	1,72973E-4	12	3
20	15	0,0746	0,02095	0,0121	4,3888E-4	12	3
40	62	0,09894	0,01067	0,00276	1,1394E-4	47	15

- Overall

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
	107	0,08209	0,02663	0,00544	7,09393E-4	83	24

- ANOVA

- Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	P Value
Q	2	0,00189	9,45355E-4	15,83524	1,07787E-4
R	3	0,01206	0,00402	67,36254	<0.0001
Model	5	0,01524	0,00305	51,06059	<0.0001
Error	18	0,00107	5,96994E-5		
Corrected Total	23	0,01632			

At the 0.05 level, the population means of Q are significantly different.

At the 0.05 level, the population means of R are significantly different.

- Means Comparisons

- Tukey Test

+ Q

+ R

- Q's Grouping Letters Table

	Mean	Groups
Silty	0,09437	A
Clayey	0,08141	B
Sandy	0,06469	C

Means that do not share a letter are significantly different.

- R's Grouping Letters Table

	Mean	Groups
40	0,09894	A
20	0,0746	B
10	0,04733	C
5	0,04007	C

Tabla A 9

ANOVA para la longitud de la hoja en función de la concentración de fósforo y la textura del suelo

Input Data
 Descriptive Statistics
 [Suelto]

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
5	3	9,08239	0,81761	0,47205	0,66849	0	3
10	3	8,18111	1,08007	0,62358	1,16656	0	3
20	3	7,99874	0,96901	0,55946	0,93898	0	3
40	3	7,53729	0,67694	0,39083	0,45825	0	3
80	3	7,49926	0,69048	0,39865	0,47677	0	3
0	3	7,78619	0,25086	0,14484	0,06293	0	3

Sustrato

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
Arenoso	6	8,77012	0,80385	0,32817	0,64618	0	6
Arcilloso	6	7,9775	0,48465	0,19786	0,23489	0	6
Limoso	6	7,29488	0,58969	0,24074	0,34774	0	6

Overall

ANOVA
 Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	P Value
[Suelto]	5	5,14118	1,02824	10,2533	0,00109
Sustrato	2	6,54111	3,27056	32,6131	<0.0001
Model	7	11,68229	1,6689	16,64181	<0.0001
Error	10	1,00284	0,10028		
Corrected Total	17	12,68513			

At the 0.05 level, the population means of [Suelto] are significantly different.
 At the 0.05 level, the population means of Sustrato are significantly different.

Means Comparisons
 Tukey Test
 [Suelto]
 Sustrato
 [Suelto]'s Grouping Letters Table

	Mean	Groups
5	9,08239	A
10	8,18111	B
20	7,99874	B
0	7,78619	B
40	7,53729	B
80	7,49926	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Sustrato's Grouping Letters Table

	Mean	Groups
Arenoso	8,77012	A
Arcilloso	7,9775	B
Limoso	7,29488	C

Tabla A 10

ANOVA para la longitud de la raíz en función de la concentración de fósforo y la textura del suelo

Descriptive Statistics

[Soluta]

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
5	3	6,97843	0,71148	0,41077	0,50621	0	3
10	3	8,11911	0,50235	0,29003	0,25236	0	3
20	3	8,82955	0,20482	0,11825	0,04195	0	3
40	3	9,58405	0,32902	0,18996	0,10826	0	3
80	3	9,62457	0,33497	0,19339	0,1122	0	3
0	3	8,38249	0,51884	0,29955	0,2692	0	3

Sustrato

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
Arenoso	6	8,54684	1,03735	0,4235	1,07609	0	6
Arcilloso	6	8,29841	1,18655	0,48441	1,4079	0	6
Limoso	6	8,91385	0,88804	0,36254	0,78862	0	6

Overall

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
	18	8,58637	1,01499	0,23924	1,0302	0	18

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	P Value
[Soluta]	5	14,93311	2,98662	20,88583	<0.0001
Sustrato	2	1,15037	0,57519	4,02236	0,05227
Model	7	16,08348	2,29764	16,0677	1,07111E-4
Error	10	1,42997	0,143		
Corrected Total	17	17,51346			

At the 0.05 level, the population means of [Soluta] are significantly different.
At the 0.05 level, the population means of Sustrato are not significantly different.

Means Comparisons

Tukey Test

[Soluta]

Sustrato

[Soluta]'s Grouping Letters Table

	Mean	Groups
80	9,62457	A
40	9,58405	A
20	8,82955	A B
0	8,38249	B
10	8,11911	B
5	6,97843	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Sustrato's Grouping Letters Table

	Mean	Groups
Limoso	8,91385	A
Arenoso	8,54684	A B
Arcilloso	8,29841	B

Tabla A 11

ANOVA para la biomasa en función de la concentración de fósforo y la textura del suelo

1 ANOVATwoWay (17/11/2025 11:30:46)

+ Notes

+ Input Data

Descriptive Statistics

[Soluto]

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
5	3	0,964	0,135	0,07794	0,01823	0	3
10	3	0,897	0,08354	0,04823	0,00698	0	3
20	3	0,83477	0,06198	0,03579	0,00384	0	3
40	3	0,46833	0,06133	0,03541	0,00376	0	3
80	3	0,365	0,03205	0,0185	0,00103	0	3
0	3	0,60633	0,2332	0,13464	0,05438	0	3

[Sustrato]

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
Arenoso	6	0,67717	0,19977	0,08156	0,03991	0	6
Arcilloso	6	0,62117	0,29482	0,12036	0,08692	0	6
Limoso	6	0,76938	0,27459	0,1121	0,0754	0	6

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	P Value
[Soluto]	5	0,90192	0,18038	16,51556	1,49754E-4
Sustrato	2	0,06722	0,03361	3,07708	0,0909
Model	7	0,96914	0,13845	12,676	3,01027E-4
Error	10	0,10922	0,01092		
Corrected Total	17	1,07836			

At the 0.05 level, the population means of [Soluto] are significantly different.

At the 0.05 level, the population means of Sustrato are not significantly different.

Means Comparisons

Tukey Test

+ [Soluto]

+ Sustrato

[Soluto]'s Grouping Letters Table

	Mean	Groups
5	0,964	A
10	0,897	A B
20	0,83477	A B
0	0,60633	B C
40	0,46833	C
80	0,365	C

Means that do not share a letter are significantly different.

[Sustrato]'s Grouping Letters Table

	Mean	Groups
Limoso	0,76938	A
Arenoso	0,67717	A
Arcilloso	0,62117	A

Tabla A 12

ANOVA para la longitud de la hoja en función de la concentración de nitrógeno y la textura del suelo

Input Data Descriptive Statistics [Soluto]

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
10	3	8,67778	1,55682	0,89883	2,4237	0	3
20	3	9,29667	1,69175	0,97673	2,86203	0	3
40	3	10,8381	1,51055	0,87212	2,28176	0	3
80	3	12,87	0,12124	0,07	0,0147	0	3
160	3	13,38	1,11946	0,64632	1,2532	0	3
0	3	9,97674	2,39887	1,38499	5,75458	0	3

Sustrato

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
Arenoso	6	10,68083	3,13049	1,27802	9,79998	0	6
Arcilloso	6	10,79486	1,98983	0,81234	3,95942	0	6
Limoso	6	11,04395	1,73744	0,70931	3,01871	0	6

Overall

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	P Value
[Soluto]	5	55,1244	11,02488	3,83259	0,03363
Sustrato	2	0,41379	0,2069	0,07192	0,93108
Model	7	55,53819	7,93403	2,75811	0,07113
Error	10	28,76616	2,87662		
Corrected Total	17	84,30436			

At the 0.05 level, the population means of [Soluto] are significantly different.
 At the 0.05 level, the population means of Sustrato are not significantly different.

Means Comparisons

Tukey Test

[Soluto]

Sustrato

[Soluto]'s Grouping Letters Table

	Mean	Groups
160	13,38	A
80	12,87	A
40	10,8381	A
0	9,97674	A
20	9,29667	A
10	8,67778	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Sustrato's Grouping Letters Table

	Mean	Groups
Limoso	11,04395	A
Arcilloso	10,79486	A
Arenoso	10,68083	A

Tabla A 13

ANOVA para la longitud de la raíz en función de la concentración de nitrógeno y la textura del suelo

Input Data
 Descriptive Statistics
 [Soluto]

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
10	3	4,45472	1,329	0,7673	1,76623	0	3
20	3	5,38368	0,93918	0,54223	0,88205	0	3
40	3	5,74583	1,52122	0,87828	2,31411	0	3
80	3	7,064	2,15794	1,24588	4,65669	0	3
160	3	7,77611	2,34904	1,35622	5,51801	0	3
0	3	6,38742	1,03719	0,59882	1,07577	0	3

Sustrato

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
Arenoso	6	4,95092	1,32382	0,54045	1,75251	0	6
Arcilloso	6	7,70806	1,88714	0,77042	3,56131	0	6
Limoso	6	5,74691	0,79643	0,32514	0,63431	0	6

Overall

ANOVA
 Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	P Value
[Soluto]	5	21,47782	4,29556	5,19869	0,01309
Sustrato	2	24,16296	12,08148	14,62157	0,00107
Model	7	45,64078	6,52011	7,89094	0,00212
Error	10	8,26278	0,82628		
Corrected Total	17	53,90356			

At the 0.05 level, the population means of [Soluto] are significantly different.
 At the 0.05 level, the population means of Sustrato are significantly different.

Means Comparisons
 Tukey Test
 [Soluto]
 Sustrato
 [Soluto]'s Grouping Letters Table

	Mean	Groups
160	7,77611	A
80	7,064	A
0	6,38742	A B
40	5,74583	A B
20	5,38368	A B
10	4,45472	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Sustrato's Grouping Letters Table

	Mean	Groups
Arcilloso	7,70806	A
Limoso	5,74691	B
Arenoso	4,95092	B

Tabla A 14

ANOVA para la biomasa en función de la concentración de fósforo y la textura del suelo

Notes
 Input Data
 Descriptive Statistics
 [Suelto]

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
10	3	0,01667	0,00493	0,00285	2,43333E-5	0	3
20	3	0,011	0,003	0,00173	9E-6	0	3
40	3	0,01	0,00361	0,00208	1,3E-5	0	3
80	3	0,00553	0,00508	0,00293	2,57733E-5	0	3
160	3	0,00196	9,72951E-4	5,61733E-4	9,46633E-7	0	3
0	3	0,15067	0,20064	0,11584	0,04026	0	3

Sustrato

	N	Mean	SD	SEM	Variance	Missing	NonMissing
Arenoso	6	0,06825	0,15376	0,06277	0,02364	0	6
Arcilloso	6	0,01617	0,01589	0,00649	2,52567E-4	0	6
Limoso	6	0,0135	0,0076	0,0031	5,77425E-5	0	6

Overall

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	P Value
[Suelto]	5	0,05053	0,01011	1,45969	0,2851
Sustrato	2	0,01143	0,00572	0,82565	0,46572
Model	7	0,06196	0,00885	1,27854	0,34979
Error	10	0,06923	0,00692		
Corrected Total	17	0,13119			

At the 0,05 level, the population means of [Suelto] are not significantly different.
 At the 0,05 level, the population means of Sustrato are not significantly different.

Means Comparisons

Tukey Test

[Suelto]

Sustrato

[Suelto]'s Grouping Letters Table

	Mean	Groups
0	0,15067	A
10	0,01667	A
20	0,011	A
40	0,01	A
80	0,00553	A
160	0,00196	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Sustrato's Grouping Letters Table

	Mean	Groups
Arenoso	0,06825	A
Arcilloso	0,01617	A
Limoso	0,0135	A

Anexo 4

Desglose matemático del análisis de varianza (ANOVA) bifactorial

Las tablas a continuación presentan el desglose del ANOVA bifactorial, incluyendo el cálculo de sumas de cuadrados (SC), grados de libertad, cuadrados medios y estadísticos F para los factores principales (A y B), su interacción (AB) y el error. Se detallan fórmulas para cada componente.

Tabla A15

Descomposición de la Suma de Cuadrados en el Análisis de Varianza (ANOVA): Incluye SC Total, SC para los factores A y B, interacción AB y el Error (Montgomery, 2020).

Fuente de Variación	Símbolo de la suma de cuadrados (SC)	Fórmula matemática	Número de ecuación
SC Total	(SC _t)	$SC_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (Y_{ijk} - \bar{Y} \dots)^2$	Ecuación 9
SC Factor A	(SC _a)	$SC_A = bn \sum_{i=1}^a (\bar{Y}_i \dots - \bar{Y} \dots)^2$	Ecuación 10
SC Factor B	(SC _β)	$SC_B = an \sum_{j=1}^b (\bar{Y}_j - \bar{Y} \dots)^2$	Ecuación 11
SC Interacción AB	(SC _{aβ})	$SC_{AB} = n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{Y}_{ij} - \bar{Y}_i \dots - \bar{Y}_j + \bar{Y})^2$	Ecuación 12
SC Error	(SC _e)	$SC_{AB} = n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (Y_{ijk} - \bar{Y}_{ij} \dots)^2$	Ecuación 13

Nota: La Tabla A15 presenta la descomposición de la Suma de Cuadrados (SC) utilizada en el Análisis de Varianza (ANOVA) para un diseño factorial de dos factores. Se incluyen las expresiones matemáticas correspondientes a la SC total, los efectos principales de los factores A y B, la interacción AB y el error experimental, siguiendo la formulación propuesta por Montgomery (2020). Estas ecuaciones permiten cuantificar la contribución de cada fuente de variación al total de la variabilidad observada en los datos experimentales.

Tabla A16

Grados de Libertad en el Diseño de ANOVA Bifactorial: Define los grados de libertad correspondientes a cada fuente de variación: total, factores A y B, interacción y error (Montgomery, 2020).

Concepto	Expresión	Numero de ecuación
Grados de libertad Total	$gl_T=abn-1$	Ecuación 14
Grados de libertad para el Factor A	$gl_A=a-1$	Ecuación 15
Grados de libertad para el Factor B	$gl_B=b-1$	Ecuación 16
Grados de libertad para la interacción AB	$gl_{AB}=(a-1)(b-1)$	Ecuación 17
Grados de libertad para el Error	$gl_E=ab(n-1)$	Ecuación 18

Nota: La Tabla A16 presenta la asignación de los grados de libertad (gl) en el diseño de ANOVA bifactorial, correspondientes a cada fuente de variación: total, factores principales (A y B), interacción AB y error. Las expresiones matemáticas se formulan según los principios descritos por Montgomery (2020), permitiendo determinar la estructura de partición de la variabilidad en el análisis estadístico del diseño factorial.

Tabla A17

Cálculo de Cuadrados Medios para los Factores y el Error: Muestra las fórmulas para obtener los cuadrados medios dividiendo SC por sus respectivos grados de libertad.

Cuadrado medio	Expresión	Ecuación
Cuadrados medios para el Factor A	$CM_A=SC_A/gl_A$	Ecuación 19
Cuadrados medios para el Factor B	$CM_B=SC_B/gl_B$	Ecuación 20
Cuadrados medios para la interacción AB	$CM_{AB}=SC_{AB}/gl_{AB}$	Ecuación 21
Cuadrados medios para el Error	$CM_E=SC_E/gl_E$	Ecuación 22

Nota: La Tabla A17 presenta las fórmulas utilizadas para el cálculo de los cuadrados medios (CM) en el análisis de varianza bifactorial. Los valores se obtienen dividiendo las sumas de cuadrados (SC) de cada fuente de variación —factores A y B, interacción AB y error— entre sus respectivos grados de libertad, conforme a los procedimientos descritos por Montgomery (2020).

Tabla A18

Cálculo de Estadísticos F para el ANOVA de Dos Factores: Contiene los cocientes de cuadrados medios que permiten evaluar la significancia de los factores y su interacción.

Estadístico F	Expresión	Ecuación
Estadístico F para el Factor A	$F_A = CM_A / CM_E$	Ecuación 23
Estadístico F para el Factor B	$F_B = CM_B / CM_E$	Ecuación 24
Estadístico F para la interacción AB	$F_{AB} = CM_{AB} / CM_E$	Ecuación 25

Nota: La Tabla A18 muestra las fórmulas empleadas para el cálculo de los estadísticos F en el ANOVA de dos factores. Cada estadístico F se obtiene como el cociente entre los cuadrados medios de los factores o su interacción y el cuadrado medio del error, permitiendo evaluar la significancia estadística de los efectos principales y de la interacción entre los factores, según la metodología descrita por Montgomery (2020).