

ISSN 2773-7330



ALFA PUBLICACIONES

Revista Científica Indexada
Revisada por pares ciegos

VOL 8 NUM 3
CULTURA CIENTIFICA

JULIO - SEPTIEMBRE
2026

www.alfapublicaciones.com
www.cienciadigitalaeditorial.com



La revista Alfa Publicaciones se presenta como un medio de divulgación científica, se publica en soporte electrónico trimestralmente, abarca temas de carácter multidisciplinar. Dirigida a investigadores, tiene el objetivo de publicar artículos originales e inéditos resultados de investigación, en inglés, portugués y español, de alcance internacional, que cumplan con lo estipulado en el código de ética. El equipo editorial y científico tiene el compromiso ético y de responsabilidad en la aplicación de la política y gestión de la revista, utilizando herramientas de detección de plagio Su periodicidad es trimestral. Publica mínimamente 20 artículos distribuidos en 4 números al año, bajo un sistema Open Access. La revista utiliza el sistema de revisión externa por pares expertos, de forma anónima, mediante el método "doble ciego" (double-blind peer review).

ISSN: 2773-7330 versión electrónica

Los aportes para la publicación están constituidos por:

Artículos Originales, Artículos de Revisión, Informes Técnicos, Comunicaciones en congresos, Comunicaciones cortas, Cartas al editor, Estados del arte & Reseñas de libros.



EDITORIAL REVISTA CIENCIA DIGITAL



Contacto: Ciencia Digital, Ambato- Ecuador

Teléfono: 0998235485

Publicación:

w: www.cienciadigital.org

w: www.cienciadigitaleditorial.com

e: luisefrainvelastegui@cienciadigital.org

e: luisefrainvelastegui@hotmail.com

Director General

Dr.C. Efraín Velastegui López. PhD. ¹

"Investigar es ver lo que todo el mundo ha visto, y pensar lo que nadie más ha pensado".

Albert Szent-Györgyi

¹ Magister en Tecnología de la Información y Multimedia Educativa, Magister en Docencia y Currículo para la Educación Superior, Doctor (PhD) en Ciencia Pedagógicas por la Universidad de Matanza Camilo Cien Fuegos Cuba, cuenta con más de 120 publicaciones en revista indexadas en Latindex y Scopus, 21 ponencias a nivel nacional e internacional, 16 libros con ISBN, en multimedia educativa registrada en la cámara ecuatoriana del libro, tres patentes de la marca Ciencia Digital, Acreditación en la categorización de investigadores nacionales y extranjeros Registro REG-INV-18-02074, Director, editor de las revistas indexadas en Latindex Catalogo 2.0, Ciencia Digital, Visionario Digital, Explorador Digital, Conciencia Digital, Anatomía Digital, Alfa Publicaciones y editorial Ciencia Digital registro editorial No 663. Cámara Ecuatoriana del libro director de la Red de Investigación Ciencia Digital, emitido mediante Acuerdo Nro. SENESCYT-2018-040, con número de registro REG-RED-18-0063

PRÓLOGO

El desarrollo educativo en Ecuador, alcanza la vanguardia mundial, procurando mantenerse actualizada y formar parte activa del avance de la conciencia y la tecnología con la finalidad de que nuestro país alcance los estándares internacionales , ha llevado a quienes hacemos educación, a mejora y capacitarnos continuamente permitiendo ser conscientes de nuestra realidad social como demandante de un cambio en la educación ecuatoriana, de manera profunda, ir a las raíces, para así poder acceder a la transformación de nuestra ideología para convertirnos en forjadores de personalidades que puedan dar solución a los problemas actuales, con optimismo y creatividad de buscar un futuro mejor para nuestras educación; por ello, docentes y directivos tenemos el compromiso de realizar nuestra tarea con seriedad, respeto y en un contexto de profesionalización del proceso pedagógico.

Índice

1. Efecto de dos abonos orgánicos en dos variedades de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*)

(Andrea Patricia Guapi Auquilla, Henry Paúl Freire Bravo, Vilma Fernanda Noboa Silva, Jean Carlos Ruiz Hernández)

06-23

2. Análisis del comportamiento vibracional y ultrasónico de las fallas en engranajes rectos

(Eduardo Hernández Dávila, César Gallegos Londoño, Clemente Alarcón Arévalo)

24-42

3. Modelo comparativo de la ecuación de calor unidimensional: perspectivas deterministas y estocásticas

(Brigith Magdalena Jiménez Tillaguango, Lidia del Rocio Castro Cepeda)

43-69

4. Evaluación de la tolerancia a la salinidad en soya (*Glycine max* L.) mediante el rendimiento germinativo

(Diana Karina Ramírez Andrade, Gabriela Eugenia Ajila Celi)

70-84

5. Tolerancia del cultivo de maní (*Arachis hypogaea* L.) al estrés salino en función del rendimiento germinativo

(Adrian Alexander Ibarra Chevez, Gabriela Eugenia Ajila Celi)

85-101

Efecto de dos abonos orgánicos en dos variedades de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*)

*The effect of two organic fertilizers in two varieties of roselle (*Hibiscus sabdariffa*)*

- ¹ Andrea Patricia Guapi-Auquilla  <https://orcid.org/0000-0003-0711-6391>
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador
aguapi@epoch.edu.ec
- ² Henry Paúl Freire-Bravo  <https://orcid.org/0009-0008-7605-7704>
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador
henryfreire18@gmail.com
- ³ Vilma Fernanda Noboa-Silva  <https://orcid.org/0000-0002-3164-7304>
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador
vilma.noboa@epoch.edu.ec
- ⁴ Jean Carlos Ruiz-Hernández  <https://orcid.org/0000-0002-7801-5566>
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador
jean.ruiz@epoch.edu.ec



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 10/04/2026

Revisado: 09/05/2026

Aceptado: 19/06/2026

Publicado: 03/07/2026

DOI: <https://doi.org/10.33262/ap.v8i3.696>

Cítese:

Guapi Auquilla, A. P., Freire Bravo, H. P., Noboa Silva, V. F., & Ruiz Hernández, J. C. (2026). Efecto de dos abonos orgánicos en dos variedades de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*). AlfaPublicaciones, 8(3), 6–23. <https://doi.org/10.33262/ap.v8i3.696>



ALFA PUBLICACIONES, es una revista multidisciplinar, **trimestral**, que se publicará en soporte electrónico tiene como **misión** contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://alfapublicaciones.com>

La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec

Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons Attribution Non Commercial No Derivatives 4.0 International. Copia de la licencia: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Palabras claves:

Fertilización
orgánica,
Jamaica,
características
morfo-
agronómicas,
rendimiento,
cáliz.

Resumen

Introducción: la investigación evalúa el efecto de dos tipos de abonos orgánicos sobre las características morfo-agronómicas de dos variedades de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) bajo condiciones de campo en el cantón Tena, provincia de Napo, Ecuador. **Objetivos:** evaluar el efecto de la aplicación de gallinaza y humus de lombriz sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento de dos variedades de Jamaica, e identificar las diferencias morfo-agronómicas entre ellas. **Metodología:** se analizaron variables como porcentaje de germinación, altura de planta, ancho y largo de hoja, días a floración, peso de fruto por planta y rendimiento. Los datos fueron evaluados mediante análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey al 5 % de significancia. **Resultados:** los resultados mostraron diferencias significativas en el porcentaje de germinación entre variedades, destacándose Estrella Costeña (88 %) frente a Patriota (76.3 %). En las variables morfo-agronómicas relacionadas con el crecimiento vegetativo, el factor abono fue altamente significativo, evidenciando que la gallinaza y el humus de lombriz promovieron un mayor desarrollo foliar y una mayor altura de planta en comparación con el tratamiento testigo sin fertilización. Durante la fase reproductiva, los abonos orgánicos aceleraron la floración e incrementaron el peso de fruto por planta, lo que se reflejó en un aumento del rendimiento. **Conclusiones:** los resultados indican que, aunque la variedad influye en el vigor inicial y en la capacidad de germinación, la fertilización orgánica constituye el factor más importante en la determinación del rendimiento final del cultivo de Jamaica. **Área de estudio general:** Agronomía. **Área de estudio específica:** Nutrición vegetal. **Tipo de artículo:** Original.

Keywords:

Organic
fertilization,
roselle,
morpho-
agronomic
characteristics,
yield,

Abstract

Introduction: the research evaluates the effect of two types of organic fertilizers on the morpho-agronomic characteristics of two varieties of Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) under field conditions in the Tena canton, Napo province, Ecuador. **Objectives:** to evaluate the effect of the application of poultry manure and worm humus on the growth, development, and yield of two varieties from Jamaica, and to identify the morpho-

calyx.

agronomic differences between them. **Methodology:** variables such as germination percentage, plant height, leaf width and length, days at flowering, fruit weight per plant and yield were analyzed. Data were evaluated using analysis of variance (ANOVA) and Tukey's mean comparison tests at 5% significance. **Results:** the results showed significant differences in the percentage of germination between varieties, with Estrella Costeña (88 %) standing out compared to Patriota (76.3 %). In the morpho-agronomic variables related to vegetative growth, the fertilizer factor was highly significant, evidencing that poultry manure and worm humus promoted greater leaf development and a higher plant height compared to the control treatment without fertilization. During the reproductive phase, organic fertilizers accelerated flowering and increased the weight of fruit per plant, which was reflected in an increase in yield. **Conclusions:** the results indicate that, although variety influences initial vigor and germination capacity, organic fertilization is the most crucial factor in determining the final yield of the Jamaican crop. **General area of study:** Agronomy. **Specific area of study:** Plant nutrition. **Item type:** Original.

1. Introducción

Hibiscus sabdariffa L., conocida comúnmente como Flor de Jamaica karkadé es un arbusto que pertenece a la familia Malvaceae (Obediente-Talavera et al., 2023; Mareh & Al-Refai, 2025; Silva et al., 2018). Originaria de África tropical, algunos estudios sitúan su centro de domesticación en regiones de Asia como la India (Caamal et al., 2020;). Actualmente se distribuye en las regiones tropicales y subtropicales donde constituye una especie de gran importancia económica (Ramos et al., 2020).

Su cultivo se expandió en África, Asia y América Latina debido a su potencial agroindustrial y comercial, donde constituye una alternativa de diversificación agrícola y fuente de ingresos para pequeños productores (Geja & Mengesha, 2020). Desde el punto de vista botánico la flor de Jamaica es un arbusto herbáceo que puede ser anual o bienal, alcanzando alturas que oscilan entre los 0.5 y 4 metros según la variedad y las condiciones ambientales (Mareh & Al-Refai, 2025).

Este cultivo es valorado económicamente por sus cálices carnosos, que suelen ser de color rojo intenso, aunque existen variedades de color verde o blanco. Estos cálices son una fuente rica en compuestos bioactivos, incluyendo antocianinas, flavonoides, vitamina C y ácidos orgánicos como el cítrico y el málico (Obediente-Talavera et al., 2023) . Estos

compuestos le confieren propiedades antioxidantes, diuréticas, antihipertensivas y antimicrobianas muy cotizadas (Edo et al., 2023).

Desde el punto de vista agroindustrial, la Jamaica es utilizada para la elaboración de bebidas refrescantes, infusiones, mermeladas, vinos y en la extracción de colorantes naturales (Romo-Zamarrón et al., 2023). El rendimiento de cálices depende de factores genéticos, ambientales y de manejo agronómico, siendo la fertilización uno de los elementos más determinantes (Yirzagla et al., 2023).

Una nutrición vegetal adecuada permite optimizar la eficiencia en el uso de nutrientes, mejorar la biomasa y aumentar la calidad de los cálices, actuando directamente en la competitividad del cultivo (Suraimi et al., 2024; Oñate & Flores, 2019).

En este sentido, la interacción entre variedades y tipos de fertilización constituye un campo de estudio prioritario para comprender la respuesta diferencial de los genotipos de Jamaica (Wachamo et al., 2022; Arias et al., 2020; Paredes & Guzmán, 2024). Sin embargo, la información relacionada con el comportamiento agronómico de las variedades de Jamaica bajo fertilización orgánica sigue siendo limitada, en especial en sistemas productivos de pequeña escala.

Este enfoque comparativo entre variedades aporta información valiosa para establecer recomendaciones prácticas de fertilización adaptadas a condiciones locales de cultivo (Geja & Mengesha, 2020).

En consecuencia, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de dos tipos de abonos orgánicos, gallinaza y humus, sobre las características morfo-agronómicas de dos variedades de Jamaica, con el propósito de generar evidencia científica aplicable a sistemas de producción sustentables. Adicionalmente, se busca establecer las bases de un manejo nutricional eficiente y sostenible de *H. sabdariffa* que beneficie tanto a productores como a consumidores.

2. Metodología

La zona de estudio se ubica en la parroquia Puerto Napo del cantón Tena, provincia de Napo a una altitud de 550 m.s.n.m. y coordenadas 1°06'06"S y 77°45'51"W (**Figura 1**).

Figura 1

Ubicación geográfica del ensayo



La investigación se desarrolló bajo un Diseño de Bloques Completos al Azar bifactorial (DBCA). Los dos factores en estudio fueron las variedades de Jamaica (Estrella costeña y Patriota) y los tipos de abonos (gallinaza, humus de lombriz y un testigo sin abono; **Tabla 1**), conformando seis tratamientos con tres repeticiones, para un total de 18 unidades experimentales.

Tabla 1

Tratamientos en estudio

N.º de tratamiento	Factor 1	Factor 2	F1 xF2	Descripción
T1	Estrella Costeña	Abono de gallina	Variedad 1 y abono	Estrella costeña con abono de gallina
T2		Humus de lombriz	Variedad 1 y abono	Estrella costeña con humus de lombriz
T3		Sin abono	Variedad 1 y sin abono	Estrella costeña sin abono
T4	Patriota	Abono de gallina	Variedad 2 y abono	Patriota con abono de gallina
T5		Humus de lombriz	Variedad 2 y abono	Patriota con humus de lombriz
T6		Sin abono	Variedad 2 y sin abono	Patriota sin abono

Nota: en cada unidad se evaluaron 10 plantas, aplicando 100g de abono según el tratamiento.

El manejo agronómico del ensayo incluyó la preparación del suelo, limpieza de malezas y siembra directa de 3 a 5 semillas preliminarmente desinfectadas con Carboxin + Captan y Malathion. Durante el ciclo se realizó el monitoreo de plagas y enfermedades, así como labores de abonamiento y control de malezas.

Las variables evaluadas correspondieron a características morfo-agronómicas y productivas. El porcentaje de germinación se evaluó a los 8 días después de la siembra (dds), la altura de la planta se midió a los 15, 30, 60, 90 120, 150 dds, los días a la floración se contabilizaron desde la emergencia hasta la aparición del 50% de las flores; y el rendimiento se calculó mediante el peso y número de frutos cosechados por parcela, expresados en kg ha^{-1} .

El análisis estadístico se efectuó mediante el ANOVA bifactorial, verificando los supuestos de homogeneidad de varianza. Las diferencias significativas se identificaron con la prueba de Tukey al 5%, utilizando el software INFOSTAT.

3. Resultados

En este apartado se presentan los resultados del efecto de dos abonos orgánicos en el desarrollo agronómico de las variedades Estrella Costeña y Patriota de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.). El estudio se basó en un enfoque cuantitativo con la aplicación de un diseño de bloques completos al azar, se determinó cómo la aplicación de gallinaza y humus de lombriz actúa como un factor estratégico en el vigor vegetativo, la precocidad fenológica y el rendimiento de cálices, además el estudio incluye un análisis de variables morfológico de los materiales en estudio.

3.1. Porcentaje de germinación

El análisis de varianza (ANOVA) mostró diferencias significativas entre variedades para la variable porcentaje de germinación ($p = 0,0329$), mientras que el tipo de abono y la interacción variedad $\times$ abono no presentaron efectos estadísticamente significativos ($p > 0,05$). El coeficiente de variación ($CV = 12,17\%$) indicó una adecuada precisión experimental (**Tabla 2**).

Tabla 2
ANOVA del porcentaje de germinación

F.V.	gl	p-valor
Modelo	7	0,0915
Bloque	2	0,1648
Variedad	1	0,0329 *
Abonos	2	0,1867 ns
Variedad*Abonos	2	0,263 ns
Error	10	
Total	17	
CV	12,17	

Nota: * Significativo ($p < 0.05$); ns = no significativo

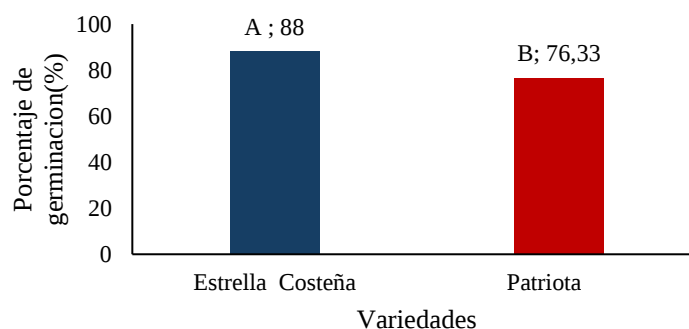
La prueba de Tukey al 5% evidenció dos rangos de significancia: la variedad Estrella Costeña alcanzó un promedio de 88% de germinación (rango A), mientras que la variedad Patriota registró 76,33% (rango B) (**Figura 2**). Estos resultados reflejan una mayor

capacidad de establecimiento inicial de la variedad Estrella Costeña, lo que podría traducirse en un mejor desempeño productivo en condiciones de campo.

Los promedios de germinación reportados de 88% y 76,33% están dentro de los rangos esperados para la especie. En condiciones controladas de laboratorio y con semillas de alta calidad, se registraron tasas superiores al 95% a los 7 días de la siembra (Caballero et al., 2024). Las variaciones hacia la baja (como el 76% de la variedad Patriota) pueden deberse a la interacción del genotipo con las condiciones ambientales específicas del sitio de estudio (Geja & Mengesha, 2020).

Figura 2

Porcentaje de germinación por variedad



Las variaciones en los caracteres hereditarios y el crecimiento de la Jamaica se atribuyen en gran medida a la constitución genética propia de cada variedad (Sharma et al., 2018). Variedades distintas como Estrella Costeña y Patriota presentan porcentajes de germinación diferentes (88% vs. 76,33%) debido a su vigor de semilla intrínseco (Adavbiele & Akhigbe, 2025).

En el estudio realizado por Ibrahim et al. (2020) mencionan que las variedades de Jamaica presentan diferencias físicas incluso en sus semillas; por ejemplo, la variedad *Bulk* tiene semillas pequeñas mientras que la *Omshiback* tiene semillas grandes. Estas diferencias físicas y genéticas impactan directamente en la viabilidad y el éxito de la germinación (Caballero et al., 2024).

3.2. Altura de planta

El ANOVA representado en la **Tabla 3** mostró que en las primeras etapas (15 dds) no se observaron diferencias significativas entre variedades ni tipos de abono ($p > 0,05$), indicando un crecimiento inicial homogéneo. A los 30 dds, el factor abonos presentó diferencias significativas ($p = 0,0268$), mientras que la variedad y la interacción no fueron relevantes. A partir de los 60 dds y hasta los 150 dds, el efecto de los abonos se mantuvo altamente significativo ($p < 0,01$ en varios momentos), confirmando que la fertilización orgánica influyó de manera consistente en el desarrollo en altura. El coeficiente de variación (CV) osciló entre 6,22% y 22,53%, valores aceptables para experimentos de campo, aunque con mayor variabilidad en la etapa intermedia (60 dds).

Tabla 3

ANOVA para la altura de la planta (cm) a los 15, 30, 60, 120 y 150 dds.

F.V.	Gl	Etapas					
		15 días	30 días	60 días	90 días	120 días	150 días
		p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor
Modelo	7	0.8455	0.1284	0.0466	0.0859	0.0567	0.0601
Bloque	2	0.8285	0.2342	0.1575	0.3897	0.4565	0.4478
Variedad	1	>0.9999 ns	0.7544 ns	0.4754 ns	0.4279 ns	0.3208 ns	0.9336 ns
Abonos	2	0.7597 ns	0.0266 *	0.0078 **	0.0109 *	0.0060 **	0.0059 *
Variedad*Abonos	2	0.364 ns	0.5998 ns	0.5906 ns	0.7831 ns	0.8353 ns	0.6537 ns
Error	10						
Total	17						
Promedio							
CV		6.22	12.41	22.53	19.31	14.46	11.3

Nota: ** Altamente Significativo, * Significativo ($p < 0.05$); ns = no significativo

La prueba de separación de medias de Tukey al 5% en la **Tabla 4** mostró diferencias significativas entre los abonos en estudio en la variable altura de planta. A los 30 dds, la gallinaza (26,53 cm) y el humus de lombriz (23,3 cm) se ubicaron en el mismo grupo estadístico (A), mientras que el testigo sin abono (21,03 cm) se diferenció en el grupo B. A los 60 dds, la gallinaza (80,93 cm) mantuvo el grupo A, el humus de lombriz (84,97 cm) se ubicó en un rango intermedio (AB), y el testigo sin abono (47,1 cm) permaneció en el grupo B. Esta tendencia se mantuvo en las evaluaciones posteriores (90, 120 y 150 dds), donde los tratamientos con abonos orgánicos presentaron valores significativamente superiores en altura respecto al testigo, consolidándose en los grupos A y AB, mientras que el testigo se mantuvo en el grupo B.

Tabla 4

Prueba de Tukey para la altura de la planta (cm) a los 30, 60, 120 y 150 dds.

Abonos	Etapas				
	30 días	60 días	90 días	120 días	150 días
Gallinaza	26.53 A	80.93 A	153.33 A	216.2 A	257.1 A
Humus de lombriz	23.3 AB	64.97 AB	135.73 AB	200.13 A	248.4 A
Sin abono	21.03 B	47.1 B	99.13 B	152.03 B	197.23 B

Nota: medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Los resultados muestran que la gallinaza (estiércol de aves) produjo las plantas más altas en todas las etapas (alcanzando 257.1 cm a los 150 dds), esto debido al aporte del nitrógeno, ya que es el nutriente primario que determina la altura y productividad en el cultivo de Jamaica (Mareh & Al-Refai, 2025). Ibeabuchi et al. (2025) señalan que las plantas tratadas con estiércol de aves muestran el incremento más notable y efectivo en

altura, debido a un suministro adecuado y rápido de nitrógeno en comparación con otros abonos orgánicos.

Mareh & Al-Refai (2025) manifiesta que el nitrógeno contribuye a la síntesis de aminoácidos como el triptófano, base para la formación de ácido indolacético (IAA), esencial para la división y elongación celular, lo que se traduce directamente en un aumento de la altura del tallo principal.

A diferencia de los fertilizantes químicos, los orgánicos liberan nutrientes de forma gradual (Ibrahim et al., 2020). Esto justifica por qué a los 120 y 150 días, el humus de lombriz logra niveles de crecimiento competitivos con la gallinaza, al haber estabilizado la oferta nutricional en el suelo durante el ciclo largo del cultivo (Norhayati et al., 2019). Cuando no se aplica fertilización, la planta depende únicamente de la fertilidad natural del suelo (Ibeabuchi et al., 2025). En suelos tropicales o degradados (comúnmente ácidos y pobres en materia orgánica), esto resulta en una deficiencia de nitrógeno, lo que limita drásticamente la expansión foliar y el crecimiento en altura (Omoniyi et al., 2023)

3.3. Días a la floración

El análisis de varianza de la **Tabla 5** mostró diferencias significativas únicamente en el factor abonos ($p = 0,0313$), mientras que la variedad y la interacción variedad $\times$ abono no presentaron efectos estadísticamente relevantes ($p > 0,05$). El coeficiente de variación (10,75%) indica una adecuada precisión experimental, lo que respalda la confiabilidad de los datos obtenidos.

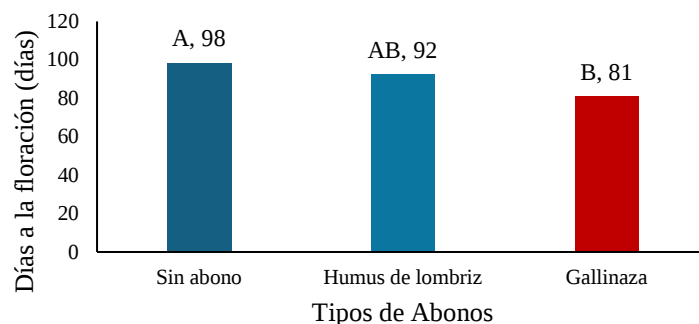
Tabla 5
ANOVA de los días de floración

F.V.	Gl	p-valor
Modelo	7	0,1009
Bloque	2	0,2468
Variedad	1	0,3113 ns
Abonos	2	0,0313*
Variedad*Abonos	2	0,331 ns
Error	10	
Total	17	
CV	10,75	

Nota: ** Altamente Significativo ($p < 0.05$); ns = no significativo

La prueba de separación de medias de Tukey al 5% evidenció para abonos dos rangos de significancia, en el rango B se encuentra el T1 (gallinaza) con una media de 81 días, el T2 se ubica en el rango AB con una media de 92,17 días y en el rango A el T3 (sin abono) con una media de 98,33 días (**Figura 3**).

Figura 3
Días a la floración



La gallinaza T1 alcanzó un proceso de maduración más precoz, esto pudo estar determinado por los componentes del abono en cuanto al elemento fósforo, las dosis óptimas de fertilizantes orgánicos ricos en fósforo permiten una floración significativamente más temprana el fósforo es un nutriente crítico que mejora y acelera el desarrollo temprano del cultivo (Yirzagla et al., 2023).

La gallinaza se describe como un abono con una composición de nutrientes bastante alta que se liberan de manera efectiva para la planta (Omoniyi et al., 2023). Un suministro adecuado de los elementos básicos como nitrógeno, fósforo y potasio estimula los procesos metabólicos y la división celular, permitiendo que la planta complete sus etapas fenológicas más rápido que una planta desnutrida (Yirzagla et al., 2023).

Además, la aplicación de abonos orgánicos mejora el pH y las propiedades físicas del suelo, lo que facilita una absorción de energía y nutrientes más eficiente, acortando el ciclo hacia la reproducción (Norhayati et al., 2019).

Sin enmiendas externas, las plantas dependen de la fertilidad natural del suelo, la cual suele ser muy baja en nitrógeno y fósforo (Ibeabuchi et al., 2025). Lo provoca que la planta tenga un desarrollo vegetativo mucho más lento (Yirzagla et al., 2023).

3.4. Número de frutos

El análisis de varianza para la variable número de frutos en la **Tabla 6** nos indica que no existen diferencias significativas en los factores en estudio en este caso aceptamos la hipótesis nula.

Tabla 6
ANOVA del número de frutos

F.V.	Gl	p-valor
Modelo	7	0,2429
Bloque	2	0,9331
Variedad	1	0,208 ns
Abonos	2	0,056 ns
Variedad*Abonos	2	0,5166 ns

Tabla 6

ANOVA del número de frutos (continuación)

F.V.	Gl	p-valor
Error	10	
Total	17	
CV	98,96	

Nota: * Significativo ($p < 0.05$); ns = no significativo

3.5. Peso del fruto por planta

El ANOVA de la **Tabla 7** mostró diferencias significativas únicamente en el factor abonos ($p = 0,0445$), mientras que la variedad y la interacción variedad $\times$ abono no presentaron efectos estadísticamente relevantes ($p > 0,05$). El coeficiente de variación fue de 10,55%, esto indica una adecuada precisión experimental.

Tabla 7

ANOVA del peso del fruto por planta

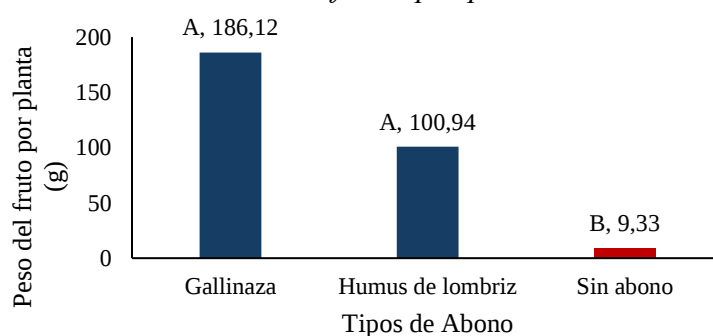
F.V.	gl	p-valor
Modelo	7	0,1976
Bloque	2	0,5362
Variedad	1	0,3098 ns
Abonos	2	0,0445*
Variedad*Abonos	2	0,536 ns
Error	10	
Total	17	
CV	10,55	

Nota: * Significativo ($p < 0.05$); ns = no significativo

La prueba de separación de medias de Tukey al 5% en la **Figura 4** evidenció para abonos dos rangos de significancia, en el rango A se encuentra el T1 (gallinaza) con una media de 186,62 g planta⁻¹, el T2 humus de lombriz en el rango AB con una media de 100,94 g planta⁻¹ y en el rango B el T3 (sin abono) con una media de 9,33 g planta⁻¹.

Figura 1

Peso de los frutos por planta



El estiércol de aves (gallinaza) tiene una composición de nutrientes bastante alta (2,73% de Nitrógeno) en comparación con otros abonos animales (Omoniyi et al., 2023), la presencia de este elemento esencial estimula la acumulación de productos fotosintéticos, lo que se traduce directamente en un incremento significativo del peso fresco y seco de la masa vegetativa (Mareh & Al-Refai, 2025).

La gallinaza es un abono que tiene la capacidad de actuar como un motor de crecimiento por su riqueza mineral, el humus es una enmienda benéfica de liberación lenta y la ausencia de abono impide el desarrollo básico de biomasa en la especie (Ibeabuchi et al., 2025).

3.6. Rendimiento (kg ha^{-1})

Según el ANOVA de la **Tabla 8** se evidencia diferencias significativas en el abono con un p-valor de 0,0462 para el rendimiento, por lo que aceptamos la hipótesis alternativa. Para variedades aceptamos las hipótesis nulas debido a que tiene un p-valor mayor a 0,05. El CV fue de 97,47; lo que indica una alta variabilidad en los datos de rendimiento, posiblemente asociada a condiciones de campo heterogéneas o a factores no controlados durante el ensayo.

Las variedades respondieron de manera consistente a los diferentes tipos de abono. No existe una combinación específica de "variedad x abono" que supere a las demás de forma única; el efecto del fertilizante es independiente de la genética de la planta en este experimento.

Tabla 8
ANOVA del rendimiento

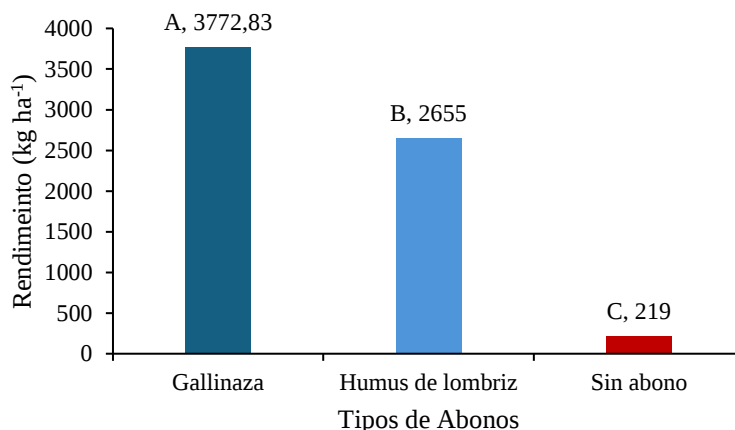
F.V.	Gl	p-valor
Modelo	7	0,2119
BLOQUE	2	0,9188
VARIEDAD	1	0,1988
ABONOS	2	0,0462*
VARIEDAD*ABONOS	2	0,5104
Error	10	
Total	17	
CV	97,47	

Nota: * Significativo ($p < 0.05$); ns = no significativo

La prueba de separación de medias de Tukey al 5% en la **Figura 5**, evidencia para los abonos tres rangos de significancia, en el rango A se encuentra el T1 (gallinaza) con una media de $3772,83 \text{ kg ha}^{-1}$, en el rango B el T2 (humus de lombriz) con una media de 2655 kg ha^{-1} y en el rango C el T3 (sin abono) con un rango 219 kg ha^{-1} .

Figura 5

Rendimiento de la Jamaica



La separación en tres rangos (A, B y C) confirma que las diferencias entre los tratamientos son estadísticamente reales y no producto del azar, validando que el tipo de abono es el factor determinante del éxito del cultivo (Romo-Zamarrón et al., 2023).

En algunos países el promedio nacional es de apenas 291 kg ha⁻¹, los resultados de T1 y T2 de este trabajo de investigación demuestran que, con un manejo orgánico adecuado, es posible alcanzar rendimientos superiores a los 1500-2000 kg ha⁻¹ (Ramos et al., 2020). Los datos reflejan que la gallinaza actúa como el motor de rendimiento más potente por su riqueza mineral (Yirzagla et al., 2023), el humus de lombriz funciona como una enmienda benéfica de liberación progresiva (Suraimi et al., 2024), y la ausencia de abono somete al cultivo a un déficit que impide cualquier rentabilidad económica viable (Ríos & Arrieta, 2013).

4. Discusión

Los resultados obtenidos en la **Tabla 2** para la germinación, sugieren que no existe un efecto de la aplicación de los abonos orgánicos, Ibeabuchi et al. (2025) en su estudio manifiesta que existe una independencia nutricional inicial, esto debido a que durante las primeras etapas del desarrollo (desde la siembra hasta aproximadamente las dos semanas), las plántulas jóvenes de Jamaica se sustentan exclusivamente de las reservas de nutrientes almacenadas en los cotiledones de la propia semilla. A diferencia del abono, la variedad genética sí es un factor determinante en la germinación ($p = 0,0329$). Las diferencias en el vigor de la semilla y sus caracteres hereditarios son lo que realmente define si una variedad alcanza, por ejemplo, un 88% de germinación frente a otra que registra un 76%.

Para la variable altura de la planta según la **Tabla 3** los abonos orgánicos ejercieron efecto sobre su crecimiento, esto se debe a que esta variable es extremadamente sensible a la disponibilidad de nutrientes, especialmente al nitrógeno, ya que este elemento contribuye

al crecimiento de los tejidos meristemáticos y a la síntesis de aminoácidos como el triptófano, que es la base para la formación de ácido indolacético (IAA), hormona esencial para la división y elongación celular, lo que permite un incremento lineal en la altura (Mareh & Al-Refai, 2025), se demostró que las plantas tratadas con gallinaza (abono rico en nitrógeno) alcanzaron las mayores alturas (257.1 cm a los 150 días), superando significativamente al humus de lombriz y al suelo sin abono.

En lo referente a los días a la floración en la **Figura 3** se puede observar que las plantas tratadas con la gallinaza redujeron el tiempo de la floración, esto sucedió porque el fósforo y el nitrógeno optimizan el desarrollo temprano del cultivo (Norhayati et al., 2019). Los nutrientes en abonos orgánicos mejoran el intercambio de energía, actuando como un catalizador que permite a la planta completar su fase juvenil más rápido que aquellas que dependen de la fertilidad nativa limitada del suelo (Yirzagla et al., 2023).

Para el peso del fruto por planta la **Figura 4** nos indica que el uso de la gallinaza potenció el peso del fruto, esto debido a niveles altos de nitrógeno que contiene, esto estimula la acumulación de productos fotosintéticos, lo que aumenta significativamente la biomasa de los cálices y el peso total por planta en comparación con suelos no tratados (Omoniyi et al., 2023).

Se evidencia un mayor rendimiento del cultivo de la Jamaica según la **Figura 5** con la aplicación de la gallinaza 3772,83 kg ha⁻¹, superando drásticamente al suelo sin abono (T3), que apenas registra 219 kg ha⁻¹ esto se debe a que este tratamiento durante el desarrollo del cultivo acumuló una mayor cantidad de biomasa estimulando la formación de ramas y nudos que se convierten en sitios de fructificación y de mayor acumulación de productos fotosintéticos en los cálices (Zakaria et al., 2019). Por otro lado, el humus de lombriz se considera como una alternativa de liberación lenta de nutrientes.

5. Conclusiones

- La aplicación de abonos orgánicos en el cultivo de Jamaica constituye una estrategia eficiente para mejorar el desarrollo morfológico del cultivo garantizando sostenibilidad y competitividad en el proceso de producción.
- Sin la aplicación de las enmiendas externas, el cultivo depende únicamente de la fertilidad nativa del suelo, ésta resulta ser insuficiente, generando una producción mínima lo que no garantiza la rentabilidad del productor.
- En este estudio las variedades estudiadas Estrella Costeña y Patriota luego de la germinación se comportaron igual, así que no se evidenció diferencias estadísticas entre las variedades.

6. Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con el artículo presentado.

7. Declaración de contribución de los autores

Todos autores contribuyeron significativamente en la elaboración del artículo.

8. Costos de financiamiento

La presente investigación fue financiada en su totalidad con fondos propios de los autores.

9. Referencias Bibliográficas

- Adavbiele, V. J., & Akhigbe, E. (2025). Variability of heritable characters in some roselles (*Hibiscus sabdariffa* L.) varieties in a forest savanna transition zone of Edo state, Nigeria. *Journal of Current Opinion in Crop Science*, 6(3), 200-206. <https://doi.org/10.62773/jcocs.v6i3.341>
- Arias Alemán, L., Ulloa Ramones, L., & Condo Plaza, L. (2020). Agro-productive behavior from *Axonopus scoparius* in Morona Santiago province. *Ciencia Digital*, 4(3), 62-71. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v4i3.1300>
- Caamal Cauich, I., García Rodríguez, J. F., Pat Fernández, V. G., & Lorenzo Ambrosio, V. (2020). Análisis de la rentabilidad de la producción de Flor de Jamaica (*Hibiscus Sabdariffa*). *Panorama Económico*, 28(2), 94-101. <https://doi.org/10.32997/pe-2020-2691>
- Caballero, P. C., Enciso Garay, C. R., Macchi L., G., Nakayama, H. D., González C., M. C., Santacruz O, V. R., Cantero G, I., Ríes, A., & Samudio Oggero, A. (2024). Dataset on the qualitative characteristics of roselle varieties (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Data in Brief*, 54 (110480), 110480. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110480>
- Edo, G. I., Samuel, P. O., Jikah, A. N., Oloni, G. O., Ifejika, M. N., Oghenegueke, O., Ossai, S., Ajokpaoghene, M. O., Asaah, E. U., Uloho, P. O., Akpogheli, P. O., Ugbune, U., Ezekiel, G. O., Onoharigho, F. O., Agbo, J. J., & Essaghah, A. E. A. (2023). Proximate composition and health benefit of Roselle leaf (*Hibiscus sabdariffa*). Insight on food and health benefits. *Food Chemistry Advances*, 3(100437), 100437. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100437>
- Geja Woliso, W., & Mengesha Kassahun, B. (2020). Performance of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) in different agro-ecologies of Ethiopia. *Medicinal & Aromatic Plants*, 9(4), 1–7. <https://doi.org/10.35248/2167-0412.20.9.352>. https://www.researchgate.net/publication/343712717_Performance_of_Roselle_Hibiscus_sabdariffa_L_in_different_Agro-Ecologies_of_Ethiopia
- Ibeabuchi, C. B., Ibeawuchi, I. I., Emma-Okafor, L. C., Irokwe, I. F., & Nnadi, K. J. (2025). Growth and yield response of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) to farmyard manure and NPK fertilizer in Owerri, Nigeria. *Asian Journal of Research and Review in Agriculture*, 7(1), 171–191. <https://doi.org/10.56557/ajrra/2025/v7i1168>
- Ibrahim, E. I. M., Abdelbagi, A. A., & Ahamed, E. H. A. (2020). Effect of chemical and organic fertilizers on growth and yield of two roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) cultivars. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 486(1), 012109. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/486/1/012109>

- Mareh, N. S., & Al-Refai, S. I. M. (2025). Effect of Nitrogen Levels on Vegetative Growth of Several Varieties of Hibiscus (*Hibiscus sabdariffa* L.). *European Journal of Ecology, Biology and Agriculture*, 2(5), 201-207. [https://doi.org/10.59324/ejeba.2025.2\(5\).14](https://doi.org/10.59324/ejeba.2025.2(5).14)
- Norhayati, Y., Ng, W. H., & Dzemi, M. A. (2019). Effects of organic fertilizers on growth and yield of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) on Bris soil. *Malaysian Applied Biology*, 48(1), 177–184. <https://jms.mabjournal.com/index.php/mab/article/view/2313>
- Obediente-Talavera, V. E., Polanco-Bravo, I. M., & Díaz-Bustillo, H. G. (2023). Diseño de un plan de comercialización de la Flor de Jamaica. Agroecología Global. *Revista Electrónica de Ciencias del Agro y Mar*, 5(9), 60-74. <https://doi.org/10.35381/a.g.v5i9.2585>
- Omoniyi Isiaq, L., Adetoyese, O. O., Hazanat, H. O., & Adebola, O. A. (2023). Response of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) varieties to fertilizer type and rates in two agro-ecologies of Southwest Nigeria. *Annals of Tropical Research*, 45(1), 98–106. <https://doi.org/10.32945/atr45i16.2023>
- Oñate Viteri, W., & Flores Mariazza, E. (2019). Efecto de la fertilización fosfatada en la fenología de tres variedades de alfalfas (*Medicago sativa* L.). *Ciencia Digital*, 3(3), 178-194. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.622>
- Paredes Peralta, A. V., & Guzmán Brito, Z. R. (2024). Literature review of the effect of adding bovine manure on agricultural production. *Conciencia Digital*, 7(4), 87-102. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v7i4.3236>
- Ramos Gutiérrez, F. A., Ramírez Cortés, B., Sánchez Machuca, M. L., Caro Velarde, F. J., & García Paredes, J. D. (2020). Rendimiento y calidad de tres variedades de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) obtenidos en cosecha continua y cosecha única. *Revista Bio Ciencias*, 7, e707. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-33802020000100307&script=sci_arttext&tlng=es
- Ríos Carrascal, O., & Arrieta Vergara, J. R. (2013). Evaluación de cuatro distancias de siembras de la Flor de Jamaica *Hibiscus sabdariffa* L. en la vereda kilómetro tres del municipio de Yondó, Antioquia. *CITECSA*, 3(5), 54–73. <https://unipaz.edu.co/revistas/revcitecsa/article/view/35>
- Romo-Zamarrón, K. F., García-Muñoz, X. C., Ávila-Ruvalcaba, G., Pérez-Cabrera, L. E., & Ramírez-Carrillo, R. E. (2023). Obtención y caracterización de polvos de flor de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) gastada. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8(1), 741–749. <https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.96>
- Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N., & Chaurasia, O. P. (2018). Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17(4), 364. <https://doi.org/10.5958/2455-7145.2018.00056.5>

- Silva, J., Pérez Quintana, M. L., & Silva, L. (2018). Empleo de extracto de hibiscus sabdariffa como antioxidante natural en longaniza. *Ciencia Digital*, 2(3), 529-539. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v2i3.174>
- Suraimi, M. F., Talib, M. N. A., Mohamad, I. N., Zainuddin, N. S., Hamzah, N., Wahid, M. A., Komari, M. Z., & Yatim, Z. M. (2024). Growth and nutrient uptake of roselle (Hibiscus Sabdariffa) with the application of organic and inorganic fertilisers. *Jurnal Kejuruteraan*, 36(6), 2625–2632. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36\(6\)-31](https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36(6)-31)
- Wachamo, H. L., Nebiyu, A., & Gessese, T. S. (2022). Calyx yield and nitrogen use efficiency of Roselle (Hibiscus sabdariffa L.) as affected by variety and levels of nitrogen fertilizer. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1742572/v1>
- Yirzagla, J., Quandahor, P., Amoako, O. A., Akologo, L. A., Lambon, J. B., Imoro, A. M., Santo, K. G., & Akanbelum, O. A. (2023). Yield of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) is influenced by manure and nitrogen fertilizer application. *American Journal of Plant Sciences*, 14(05), 599-612. <https://doi.org/10.4236/ajps.2023.145040>
- Zakaria, N. F., Ibrahim, N. I., Nor, H. M., Abd Kadir, A. A., & Ibrahim, C. H. (2019). Effect of compost and green manure to growth performance of Hibiscus sabdariffa. L and grown on BRIS soil. *Journal of Tropical Resources and Sustainable Science (JTRSS)*, 7(1), 12–18. <https://scispace.com/papers/effect-of-compost-and-green-manure-to-growth-performance-of-vvhr9zz3mi>

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Alfa Publicaciones**.



El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Alfa Publicaciones**.

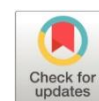


Open policy finder
Formerly Sherpa services

Análisis del comportamiento vibracional y ultrasónico de las fallas en engranajes rectos

Analysis of the vibrational and ultrasonic behavior of faults in spur gears

- ¹ Eduardo Hernández-Dávila  <https://orcid.org/0000-0003-4899-2371>
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.
Grupo de Investigación Ciencia del Mantenimiento (CIMANT)
edhernandez@epoch.edu.ec
- ² César Gallegos-Londoño  <https://orcid.org/0000-0002-8685-7501>
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.
Grupo de Investigación Ciencia del Mantenimiento (CIMANT)
cesar.gallegos@epoch.edu.ec
- ³ Clemente Alarcón-Arévalo  <https://orcid.org/0009-0002-7502-7120>
Instituto Superior Tecnológico Tsachila, Santo Domingo, Ecuador.
clementealarcon@tsachila.edu.ec



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 11/05/2026

Revisado: 12/06/2026

Aceptado: 07/07/2026

Publicado: 20/07/2026

DOI: <https://doi.org/10.33262/ap.v8i3.697>

Cítese:

Hernández Dávila, E., Gallegos Londoño, C., & Alarcón Arévalo, C. (2026). Análisis del comportamiento vibracional y ultrasónico de las fallas en engranajes rectos. AlfaPublicaciones, 8(3), 24–42. <https://doi.org/10.33262/ap.v8i3.697>



ALFA PUBLICACIONES, es una revista multidisciplinar, **trimestral**, que se publicará en soporte electrónico tiene como **misión** contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://alfapublicaciones.com>
La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec

Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons Attribution Non Commercial No Derivatives 4.0 International. Copia de la licencia: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Palabras claves:

Engranajes rectos;
análisis
vibracional;
ultrasonido pasivo;
mantenimiento
basado en la
condición;
diagnóstico de
fallas.

Resumen

Introducción. Los engranajes son elementos esenciales y costosos en los procesos industriales que sufren desgastes operativos severos. Para mitigar fallas catastróficas y paradas imprevistas, resulta crucial implementar estrategias de diagnóstico eficaces que monitoreen de manera continua la condición mecánica del sistema. **Objetivo.** Evaluar y comparar de forma analítica el comportamiento y la sensibilidad de las señales vibracionales y ultrasónicas ante la presencia de modos de falla comunes en engranajes rectos. **Metodología.** En la presente investigación de tipo aplicado con un diseño experimental, se empleó un enfoque práctico mediante el registro y procesamiento de señales dinámicas provenientes de un banco de pruebas parametrizable. Las mediciones de vibración global y presión sonora se recolectaron utilizando sensores especializados bajo condiciones controladas de defectos inducidos. **Resultados.** El análisis estadístico demostró que el parámetro de la velocidad de vibraciones eficaz V_{RMS} posee una correlación directa y superior para detectar desalineaciones angulares mecánicas. Por el contrario, el nivel global de presión sonora ultrasónica NPT demostró exclusividad y alta sensibilidad frente al avance del desgaste severo en los flancos de los dientes. En tanto que el análisis de la onda del ultrasonido demostró ser más favorable para la detección de dientes rotos en engranajes. **Conclusión.** Se determinó que la combinación complementaria del análisis vibracional y del ultrasonido pasivo optimiza el diagnóstico oportuno en transmisiones por engranajes rectos. El uso conjunto de ambas técnicas reduce la incertidumbre predictiva al especializar cada herramienta según la naturaleza geométrica de la falla. **Área de estudio general:** Mantenimiento Industrial. **Área de estudio específica:** Mantenimiento Basado en la Condición. **Tipo de estudio:** Artículo original.

Keywords:

Spur gears;
vibration analysis;
passive
ultrasound;
condition-based

Abstract

Introduction. Gears are essential and expensive elements in industrial processes that suffer severe operational wear. To mitigate catastrophic failures and unplanned downtime, it is crucial to implement effective diagnostic strategies that continuously monitor the mechanical condition of the system.

maintenance; fault diagnosis.

Objective. To analytically evaluate and compare the behavior and sensitivity of vibrational and ultrasonic signals in the presence of common fault modes in spur gears. **Methodology.** In this applied research with an experimental design, a practical approach was used through the recording and processing of dynamic signals from a parameterizable test bed. Global vibration and sound pressure measurements were collected using specialized sensors under controlled conditions of induced defects. **Results.** Statistical analysis showed that the root-mean-square vibration velocity parameter (VRMS) has a direct and superior correlation for detecting mechanical angular misalignments. Conversely, the overall ultrasonic sound pressure level (NPT) demonstrated exclusivity and high sensitivity against the progression of severe wear on the tooth flanks. Meanwhile, ultrasound waveform analysis proved to be more favorable for detecting broken gear teeth. **Conclusion.** It was determined that the complementary combination of vibrational analysis and passive ultrasound optimizes timely diagnosis in spur gear transmissions. The joint use of both techniques reduces predictive uncertainty by specializing each tool according to the geometric nature of the fault. **General Area of Study:** Industrial Maintenance. **Specific area of study:** Condition-Based Maintenance. **Type of study:** Original article.

1. Introducción

Las transmisiones por engranajes rectos constituyen elementos críticos e indispensables en el desarrollo de la maquinaria rotativa industrial contemporánea, siendo ampliamente utilizados en sectores estratégicos como el automotriz, aeronáutico y de manufactura debido a su alta eficiencia en la transferencia de potencia y torque a velocidades elevadas (Arsić et al., 2026; Bonilla-Angulo et al., 2026; Chen et al., 2026). No obstante, debido a las severas exigencias operacionales y condiciones de fricción, estos componentes están expuestos de forma recurrente a fallas imprevistas en los dientes y ejes, tales como agrietamiento, picaduras, desalineación y roturas, las cuales representan hasta el 60% de los fallos reportados en cajas reductoras (Ortega, 2021).

La ocurrencia de estas anomalías sin una detección temprana no solo compromete la integridad de los activos, sino que desencadena paradas de planta no programadas,

elevados costos de reparación e incluso accidentes catastróficos que merman la rentabilidad de las empresas (García et al., 2023; Tutasig & Taranto, 2024). Por consiguiente, el Monitoreo Basado en la Condición (MBC) emerge como una estrategia de mantenimiento preventivo crucial para caracterizar el comportamiento dinámico del sistema y estimar la vida útil de los componentes rotatorios (Villanueva-Rodríguez et al., 2022).

Si bien el análisis de vibraciones es la técnica diagnóstica más consolidada al identificar oportunamente cerca del 90% de las fallas mecánicas (García et al., 2023), la introducción de tecnologías de ultrasonido pasivo ofrece una vía complementaria aún poco explorada experimentalmente. Esto justifica la necesidad de realizar un estudio sistemático que valide y compare la sensibilidad de ambas técnicas diagnósticas frente a fallas inducidas, optimizando la confiabilidad operacional de los sistemas de transmisión.

Históricamente, la comprensión de los daños mecánicos parte del análisis físico de las interacciones en los pares cinemáticos. En este sentido Sacmaozu et al. (2026) presenta de forma exhaustiva los distintos mecanismos de falla en engranajes y sistematiza las técnicas destructivas y no destructivas empleadas para su evaluación objetiva. Dicho estudio aporta una visión práctica al examinar ejemplos reales de diferentes industrias, con el propósito de organizar rigurosamente el análisis de averías para futuras investigaciones.

Con el avance del mantenimiento basado en la condición, el análisis espectral tradicional comenzó a mostrar limitaciones para identificar defectos incipientes. Para resolver esto San Martín et al. (2010) introdujeron una metodología basada en el análisis de ciclo estacionariedad de las señales de vibración, demostrando que al aislar las componentes ciclo estacionarias de segundo orden y filtrarlas digitalmente, era posible lograr una detección mucho más temprana de fallas localizadas en los dientes de los engranajes.

La necesidad de validar empíricamente estas nuevas metodologías de procesamiento de señales impulsó el desarrollo de entornos controlados. Al respecto, Moya et al. (2014) destacaron la importancia de los bancos de prueba diseñados específicamente para ensayar transmisiones por engranajes, permitiendo simular condiciones reales de contacto, controlar variables como la carga y velocidad, y reproducir de manera acelerada los fenómenos destructivos asociados a la fatiga por contacto y flexión.

Posteriormente, aunque el análisis de vibraciones ya estaba consolidado, la comunidad científica comenzó a buscar alternativas diagnósticas no invasivas. Verucchi et al. (2015) evaluaron la eficacia del análisis espectral del torque electromagnético y la corriente del estator en los motores que accionan las cajas reductoras, comprobando que estas variables eléctricas también reflejan perturbaciones claras ante la presencia de un diente fracturado, ofreciendo un método complementario.

El verdadero salto cualitativo en la precisión diagnóstica llegó con la integración de múltiples tecnologías. Sánchez (2018) evidenció que el diagnóstico de fallos en engranajes alcanza su máxima confiabilidad a través de la fusión de datos multi sensores. En su investigación, comprobó que la combinación de señales de vibración, corriente y emisión acústica (ultrasonido) permite extraer atributos de alta sensibilidad para discriminar modos de falla simultáneos y progresivos, superando las limitaciones del análisis aislado.

En años recientes, la investigación se enfocó en caracterizar firmas específicas y cuantificar la evolución del daño. Condemaita & Molano (2022) implementaron simuladores para analizar fallas como el diente roto y la desalineación lineal, confirmando mediante espectros de aceleración y formas de onda que la falta de juego entre dientes genera armónicos fundamentales predominantes fáciles de aislar. Finalmente, Elizegi et al. (2023) profundizaron en la relación directa entre el daño físico y la respuesta vibratoria, analizando experimentalmente cómo la evolución de la fatiga superficial incrementa de manera correlacional las amplitudes de vibración en el sistema.

A pesar de los significativos avances en el monitoreo de maquinaria, la mayor parte de las investigaciones recientes se orientaron hacia el desarrollo de complejos algoritmos de aprendizaje automático (*Machine Learning*) y modelos matemáticos abstractos para clasificar fallas (Loaiza, 2021; Mejía, 2022) o hacia análisis metalúrgicos post falla de carácter destructivo (Ferreira et al., 2020; Zuñiga, 2023).

Asimismo, aunque existen softwares de simulación numérica para aproximar el desgaste abrasivo y las cargas dinámicas (Mena et al., 2023), en la práctica industrial real se observa una escasez de plataformas experimentales físicas o kits de prueba accesibles que permitan recrear de manera controlada la interacción de fallas comunes (Delgado, 2020).

Sin embargo, en la bibliografía consultada, no se encuentra suficiente evidencia empírica que correlacione de forma directa y simultánea la eficacia de las técnicas clásicas de vibración frente a tecnologías no invasivas emergentes, imposibilitando establecer criterios claros sobre qué parámetro físico o espectral es el más sensible para diagnosticar de forma complementaria la severidad de desalineaciones o roturas estructurales en un sistema de engranajes rectos (Hernández-Dávila et al., 2020).

Para dar respuesta a este vacío experimental, en este artículo se emplea un simulador físico de modos de fallas en engranajes rectos, compuesto mecánicamente por un motor eléctrico asíncrono, un par de ruedas dentadas y un alternador que actúa como sistema de carga operativa.

El método consistió en inducir de forma controlada cuatro tipos de fallos característicos bajo diferentes niveles de severidad: desalineación angular horizontal, desalineación angular vertical, desgaste de dientes y rotura progresiva de un diente del piñón. Para el diagnóstico dinámico, se emplearon de manera simultánea dos técnicas de monitoreo no

invasivas: por un lado, el análisis de vibraciones mecánicas mediante el equipo Vibrachek 200 ABG y su respectivo acelerómetro para capturar formas de onda y espectros de aceleración; y por otro, la técnica de ultrasonido pasivo empleando el equipo Ultraprobe 15000 provisto de un módulo de contacto.

Finalmente, la evaluación se realizó mediante el análisis cuantitativo y comparativo del comportamiento de los niveles globales de vibración (V_{RMS}) y de los niveles de presión sonora en el Punto de Medición (NPT) en función de la severidad del daño, determinando así la complementariedad y efectividad de ambas tecnologías.

2. Metodología

El estudio presenta un diseño experimental y aplicado mediante el empleo de un simulador de modos de fallas en engranajes. Esta modalidad se seleccionó para cumplir el objetivo de evaluar las señales predictivas frente a defectos inducidos, empleando como técnicas principales el análisis de vibraciones y el ultrasonido pasivo. La recolección de datos se realizó simulando escenarios de desalineación angular horizontal, desalineación angular vertical, aumento de la distancia entre centros (dientes desgastados) y la presencia de un engrane con dientes rotos, tomando mediciones a intervalos y en puntos de recolección convenientes para cada simulación.

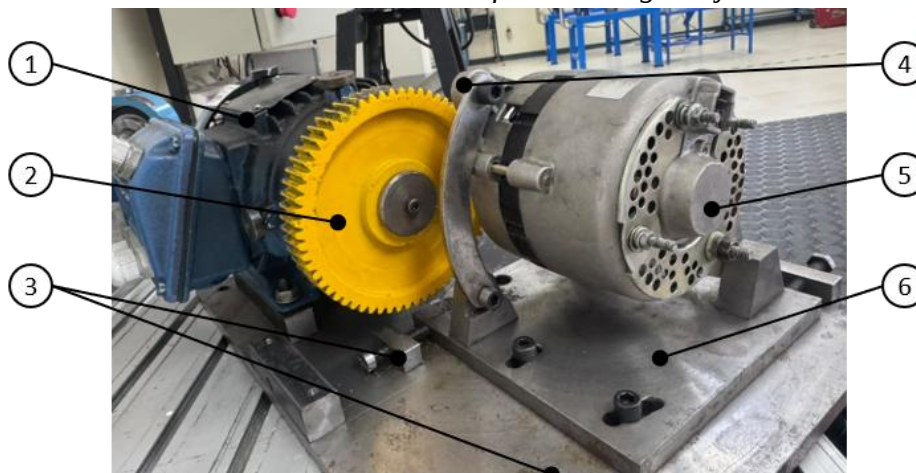
A partir de este diseño metodológico, se plantea la hipótesis de que la aplicación combinada de ambas técnicas permite diagnosticar y diferenciar de manera efectiva los distintos modos de falla presentes en el sistema. Específicamente, se postula que el análisis de vibraciones evidenciará alteraciones proporcionales en los niveles globales ante problemas continuos como la desalineación, mientras que el ultrasonido pasivo actuará de forma complementaria, resultando sumamente preciso para detectar el impacto y el tiempo de aparición de eventos aislados, como los generados por el contacto de un diente roto.

2.1. Configuración del módulo de pruebas

El simulador de modos de falla de engranajes utilizado en la presente investigación (**Figura 1**) es accionado por un motor eléctrico trifásico asíncrono de jaula de ardilla Weg W22 (1), con una potencia nominal de 373 W, rendimiento del 72%, factor de potencia de 0,69, 4 polos magnéticos, frecuencia de sincronismo de 30 Hz, frecuencia nominal de 28 Hz y una tensión de alimentación de 220 V. A este motor se encuentra acoplado el engranaje motriz (2) de acero AISI 1040, el cual posee 64 dientes, módulo 2 y un ancho de cara de 24 mm; dicho componente transmite la potencia mecánica hacia un piñón (4) de similares características estructurales pero constituido por 24 dientes, lo que establece una relación de transmisión de $64/24 = 2,67$.

Figura 1

Simulador de modos de fallas en engranajes

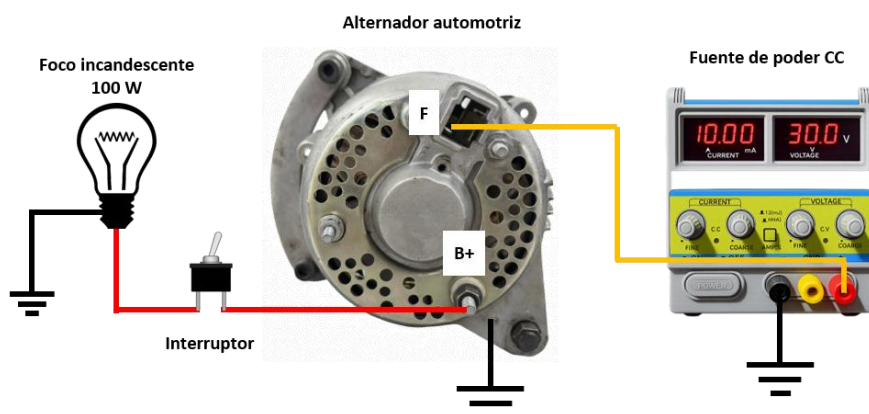


Nota: el módulo cuenta con los siguientes elementos fundamentales: motor eléctrico trifásico asíncrono de jaula de ardilla (1), engranaje motriz (2), pernos de ajuste (3), piñón (4), alternador automotriz (5) y placa móvil (6).

El piñón se encuentra acoplado a un alternador automotriz (5) cuyas conexiones eléctricas (**Figura 2**) lo convierte en un freno magnético que permite proporcionar al motor una carga equivalente al 80% de su potencia nominal, con el propósito de optimizar su funcionamiento bajo condiciones de máxima eficiencia. Este alternador se ubica sobre una placa móvil (6) accionada mediante pernos de ajuste (3), los cuales facilitan el desplazamiento del piñón respecto al engranaje para inducir de forma controlada anomalías geométricas tales como desalineación angular horizontal, desalineación angular vertical y el consecuente desgaste de los dientes.

Figura 2

Conexión eléctrica del alternador automotriz



Nota: conexiones eléctricas del alternador automotriz para convertirlo en un freno magnético.

Para que el motor eléctrico opere al 80% de su potencia nominal, se debe verificar inicialmente que la fuente de alimentación suministre corriente sin limitación y que el voltaje de salida de corriente continua (CC) se encuentre regulado en 0 V. Posteriormente, se procede a cerrar el interruptor del circuito ilustrado en la **Figura 2**; una vez que el motor alcanza la velocidad de trabajo establecida, se incrementa paulatinamente el voltaje de la fuente de CC hasta que la corriente medida mediante una pinza amperimétrica en cualquiera de las tres líneas de alimentación del motor alcance un valor de 1,58 A, intensidad que fue previamente calculada mediante la **Ecuación 1**.

$$I = \frac{P_s \cdot 0,8}{\sqrt{3} \cdot \eta \cdot V \cdot \cos\varphi} = \frac{373 \text{ W} \cdot 0,8}{\sqrt{3} \cdot 0,72 \cdot 220 \text{ V} \cdot 0,69} = 1,58 \text{ A} \quad (1)$$

Donde, P_s es la potencia mecánica nominal que entrega el motor en Watios, η es el rendimiento, V es la tensión de línea en Voltios, $\cos\varphi$ es el factor de potencia y 0,8 corresponde al factor para reducir la potencia al 80%.

2.2. Configuración de los modos de falla

Los modos de falla simulados, mismos que posteriormente se describirán con mayor detalle son los siguientes:

- desalineación angular horizontal (DAH)
- desalineación angular vertical (DAV)
- desgaste de los dientes (DD)
- diente roto (DR)

Para la simulación de la desalineación angular horizontal, se procedió a desplazar la placa móvil (6) mediante el accionamiento de los pernos de ajuste (3) ilustrados en la **Figura 1**, alcanzando de forma progresiva e individual cuatro ángulos específicos: 0,25°, 0,50°, 0,75° y 1°.

La simulación de la desalineación angular vertical se efectuó mediante la colocación progresiva de alzas calibradas de acero inoxidable austenítico AISI 304 con espesores de 0,508 mm, 0,63 mm, 1,27 mm y 1,82 mm bajo la placa móvil (6) de la **Figura 1**, situándolas específicamente en el extremo más alejado del piñón para obtener los ángulos DAV de 0,25°, 0,50°, 0,75° y 1°.

Con el objetivo de simular el desgaste de los dientes, se modificó la distancia entre centros del engranaje y el piñón mediante el accionamiento de los pernos de ajuste (3) de la placa móvil (6) detallada en la **Figura 1**, logrando de este modo establecer separaciones progresivas de 0,25 mm, 0,50 mm, 0,75 mm y 1 mm.

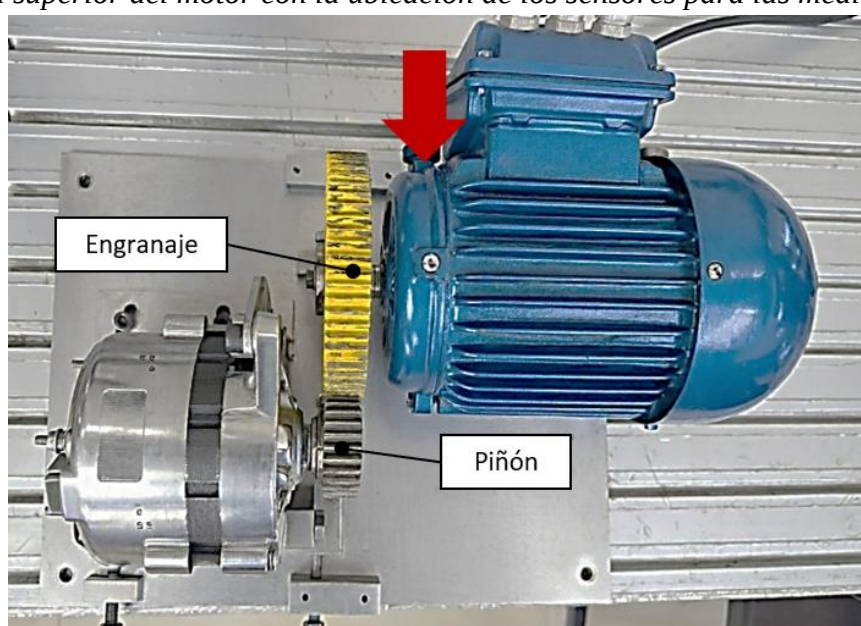
Finalmente, para la ejecución del ensayo del componente con un diente roto, se procedió a reemplazar el engranaje en estado óptimo por un elemento que presentaba dicho defecto estructural inducido de forma previa.

2.3. Método para la toma de mediciones

La adquisición de datos de vibraciones y ultrasonido se llevó a cabo mediante el analizador Vibrachek 200 ABG equipado con un acelerómetro y el equipo Ultraprobe 15000 con el módulo de contacto, respectivamente; en los dos casos se utilizó una base magnética con una fuerza de 50 libras. Las mediciones se registraron colocando los sensores en la dirección horizontal sobre el motor eléctrico, específicamente a la altura del rodamiento del lado del engranaje, como se indica en la **Figura 3**.

Figura 3

Vista superior del motor con la ubicación de los sensores para las mediciones



Nota: la flecha roja indica la ubicación del acelerómetro y del módulo de contacto para las mediciones de vibraciones y ultrasonido respectivamente.

3. Resultados

El primer resultado del análisis vibracional corresponde al espectro de aceleración (**Figura 4**) obtenido con el engranaje y el piñón en buen estado, operando en condiciones normales de funcionamiento sin ningún modo de falla inducido. En este registro base se identifican con claridad los armónicos de la frecuencia de engrane (GMF , $2GMF$ y $3GMF$), los cuales se calculan de forma directa multiplicando el número de dientes del engranaje por la velocidad de giro del eje, según la fórmula de la **Ecuación 2**:

$$GMF = \# \text{ Dientes del engranaje} \cdot \text{frecuencias del 1XE} \quad (2)$$

$$GMF = 64 \cdot 28,5 \text{ Hz} = 1824 \text{ Hz}$$

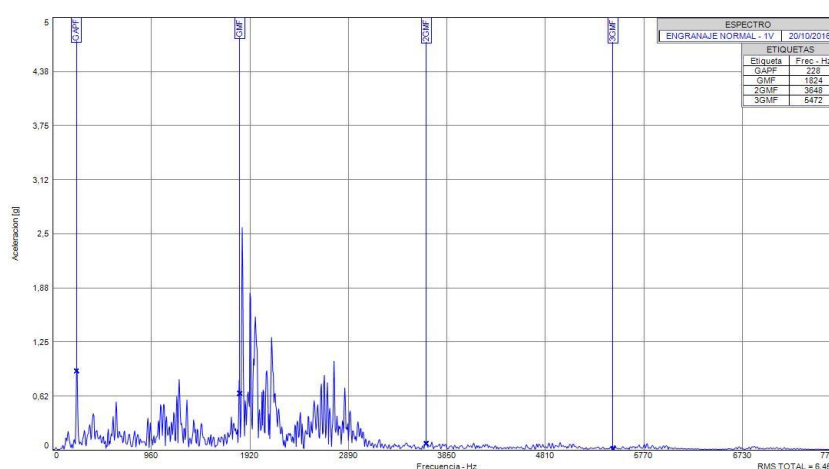
$$2GMF = GMF \cdot 2 = 1824 \text{ Hz} \cdot 2 = 3648 \text{ Hz}$$

$$3GMF = GMF \cdot 3 = 1824 \text{ Hz} \cdot 3 = 5472 \text{ Hz}$$

Como se puede notar las frecuencias de engrane superan los 1000 Hz por lo que no se las puede observar en el espectro de velocidad, por esta razón se decidió utilizar el espectro de aceleración mostrado en la **Figura 4**.

Figura 4

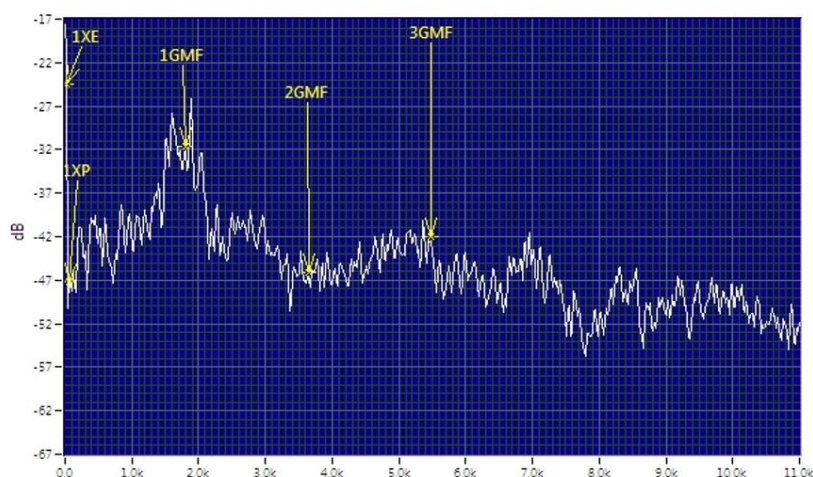
Espectro de aceleración de vibraciones del engranaje y del piñón en buen estado



El espectro ultrasónico en condiciones normales de funcionamiento (**Figura 5**) sirve como línea base de comparación. En este registro, los armónicos de baja frecuencia 1XE del engranaje y 1XP del piñón se encuentran presentes, aunque con una visibilidad reducida, al igual que *GMF* y sus múltiplos. Por su parte, el nivel global de presión sonora o NPT (*Nivel de Presión Total*) presenta un valor de 42 dB.

Figura 5

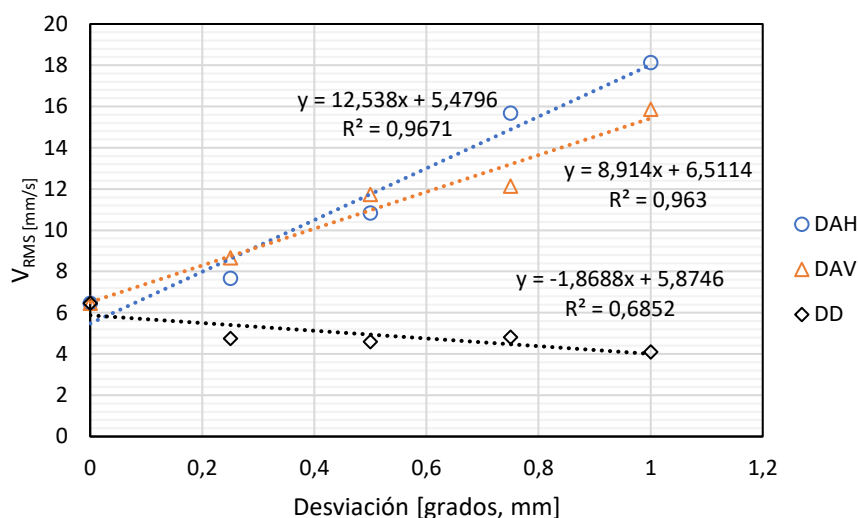
Espectro de ultrasonido del engranaje y del piñón en buen estado



La velocidad global de vibraciones en amplitud rms en mm/s (V_{RMS} [mm/s]) que se registró a medida que respectivamente las desviaciones angulares y se separación los modos de falla DAH, DAV y DD se incrementan, crean tendencias lineales, tal como se puede observar en la **Figura 6**.

Figura 6

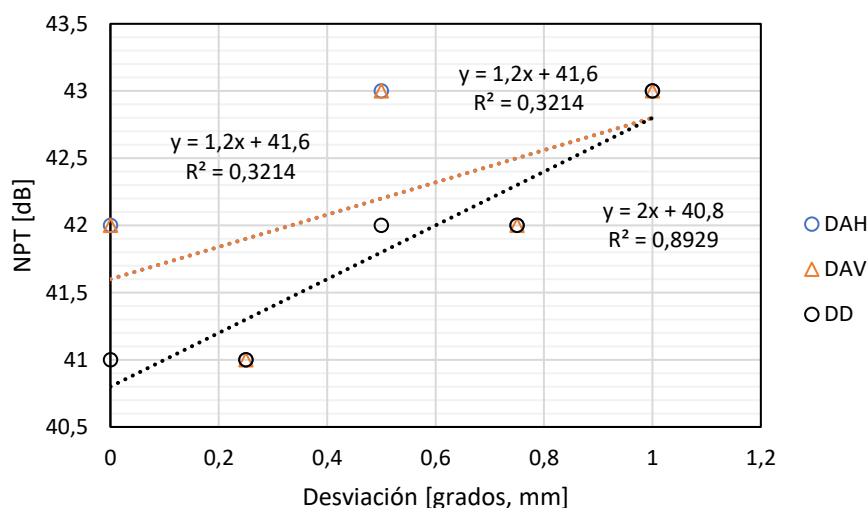
Espectro de ultrasonido del engranaje y del piñón en buen estado



Por otro lado, las mediciones del NPT (**Figura 7**) a medida que respectivamente las desviaciones angulares y se separación los modos de falla DAH, DAV y DD se incrementan, crean valores algo alejados de la tendencia lineal.

Figura 7

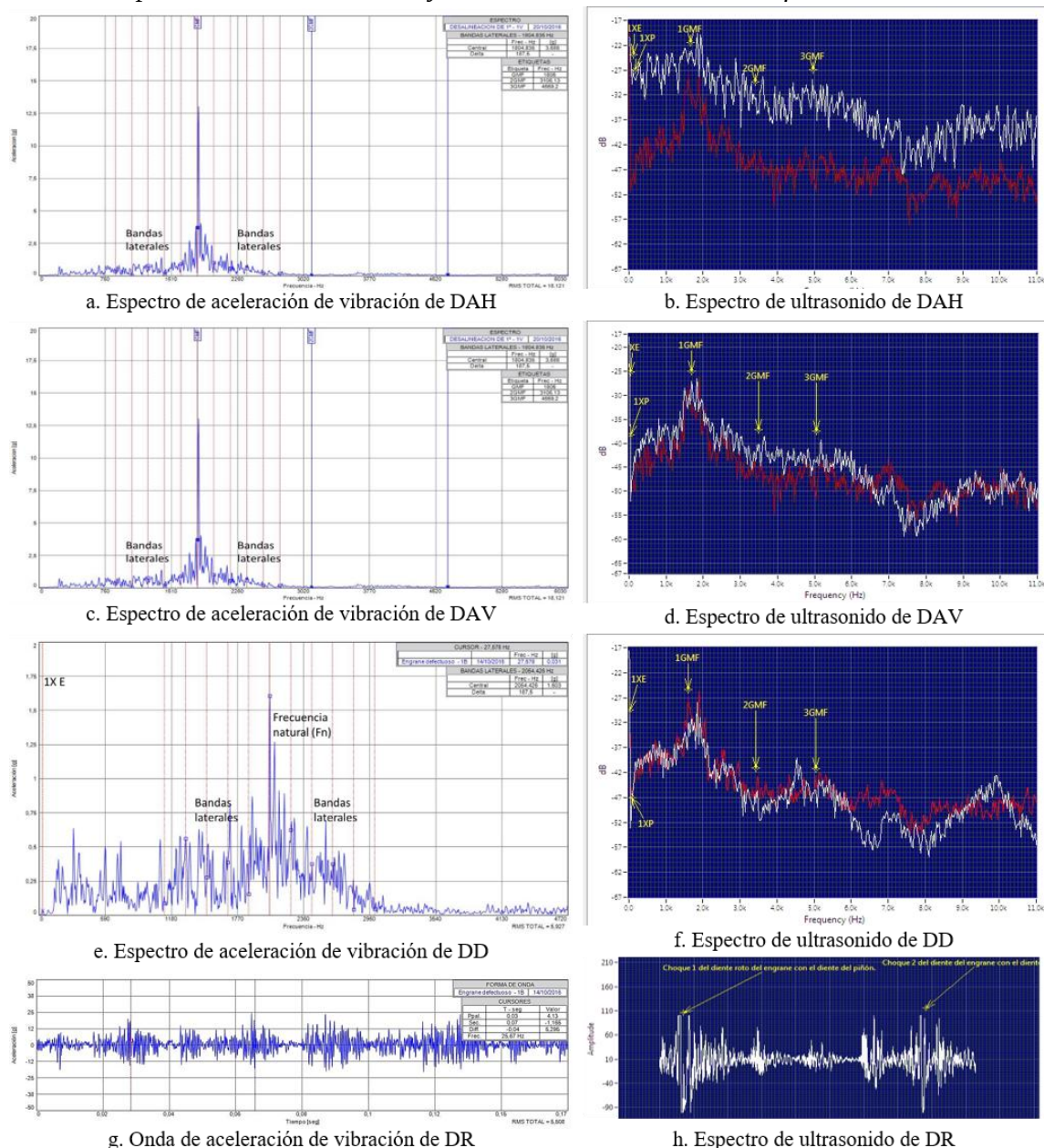
Espectro de ultrasonido del engranaje y del piñón en buen estado



La **Figura 8** permite comparar el comportamiento vibracional y ultrasónico de los modos de falla analizados DAH, DAV, DD e incluso DR ya que se plasma los espectros y ondas cuando estos modos de falla alcanzaron su máxima severidad, esto es 1° para DAH y DAV, 1 mm para DD y un diente roto para DR.

Figura 8

Comportamiento vibracional y ultrasónico de los modos de falla analizados



4. Discusión

La pendiente y la intersección de las líneas de tendencia de la variación de V_{RMS} [mm/s] y NPT [dB] a medida que incrementa la desviación de los modos de falla DAH, DAV y DD se presentan en la **Tabla 1** y **Tabla 2** respectivamente, estos parámetros se calculan mediante el método de los mínimos cuadrados.

Tabla 1

Parámetros y correlación de V_{RMS} [mm/s] vs la desviación de los modos de falla

Modo de falla	Pendiente	Intersección	R de Pearson	Correlación
DAH	12,538	5,480	0,983	Si
DAV	8,914	6,511	0,981	Si
DD	-1,869	5,875	-0,828	No

La **Tabla 1** y **Tabla 2** también contienen los coeficientes de correlación R de Pearson de cada una de las tendencias analizadas.

Tabla 2

Parámetros y correlación de NPT [dB] vs la desviación de los modos de falla

Modo de falla	Pendiente	Intersección	R de Pearson	Correlación
DAH	1,200	41,600	0,567	No
DAV	1,200	41,600	0,567	No
DD	2,000	40,800	0,945	Si

Para la validación de la correlación de las tendencias analizadas se plantea las siguientes hipótesis:

H0: la V_{RMS} [mm/s] y el NPT [dB] no son función lineal de la desviación de los modos de falla.

H1: la V_{RMS} [mm/s] y el NPT [dB] son función lineal de la desviación de los modos de falla.

Cuando el coeficiente R de Pearson calculado (**Tabla 1** y **Tabla 2**), es mayor o igual a 0,878 que es el valor crítico para 5 datos con el 95% de confianza, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que existe suficiente evidencia para aseverar de que V_{RMS} y el NPT [dB] son función lineal de la desviación de los modos de falla, respectivamente) (Triola, 2018).

La evaluación de hipótesis evidencia la correlación detallada en las **Tabla 1** y **Tabla 2**, confirmando que la desalineación angular horizontal y vertical, incrementa el parámetro V_{RMS} de forma directamente proporcional. Por consiguiente, se demuestra que el monitoreo continuo de la V_{RMS} constituye un método eficaz para la detección temprana de anomalías por DAH y DAV.

Respecto al desgaste de los dientes, se observa que su incremento no muestra una correlación estadísticamente significativa con el parámetro V_{RMS} ; sin embargo, sí

presenta una dependencia directa con el NPT. Por lo tanto, se demuestra que la técnica de inspección mediante ultrasonido pasivo resulta altamente eficaz para el monitoreo y diagnóstico de este tipo de fallas mecánicas.

Cabe mencionar que las correlaciones demostradas pueden utilizarse para predecir el nivel de severidad o desviación de los modos de falla DAH, DAV y DD a partir de los valores de V_{RMS} y NPT respectivamente, para el tipo de engranes descritos en la metodología; sin embargo no se puede extender la misma correlación para todos los engranes de diente recto, lo que sí se puede aseverar de manera general para todo engrane de diente recto es que la DAH y DAV incrementará la V_{RMS} y que el DD incrementará el NPT, de manera proporcional con mayor o menor pendiente de acuerdo con cada caso particular.

Por otra parte, los espectros de ultrasonido (**Figura 8**) correspondientes a 1° para DAH y DAV, 1 mm para DD no generan incrementos notables de armónicos GMF o de otro tipo, por lo que, al mantenerse relativamente invariables, no se considera útil para el monitoreo de estos modos de falla.

A su vez, el análisis espectral de la aceleración de vibraciones revela un incremento en la amplitud de la frecuencia de engrane GMF inducido por la severidad de la desalineación angular horizontal y vertical. Asimismo, ante la presencia de desgaste y rotura de dientes (**Figura 8**), se identifica la excitación de la frecuencia natural del engranaje debido a los impactos mecánicos generados durante la operación del sistema. Al comparar las formas de onda de vibración y de ultrasonido (**Figura 8**), se evidencia un incremento en la amplitud transitoria cada vez que el diente roto del engranaje completa una revolución e impacta con el piñón; sin embargo, este efecto es más claro en la onda de ultrasonido. Este comportamiento permite determinar la frecuencia de impacto mediante la **Ecuación 3**; de este modo, si dicha frecuencia coincide con la frecuencia de rotación del eje 1X, se confirma la presencia de este modo de falla.

$$Frecuencia\ de\ choque\ del\ diente\ roto = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

$$Frecuencia\ de\ choque\ del\ diente\ roto = \frac{1}{(0,0383 - 0,0027)\ s} = 28,01\ Hz$$

Se observa que el valor calculado para la frecuencia de impacto por diente roto, equivalente a 28,01 Hz, presenta una alta correspondencia con la frecuencia de rotación del eje 1X establecida en 28 Hz. Por consiguiente, esta coincidencia analítica corrobora de manera concluyente la presencia de una discontinuidad geométrica estructural por rotura en al menos uno de los componentes evaluados.

5. Conclusiones

- Se demostró que el simulador físico de fallas mecánicas constituye una herramienta científica fundamental para validar de forma controlada la progresión del daño estructural en transmisiones por engranajes rectos.
- La investigación aporta al campo del mantenimiento predictivo un enfoque dual correlacionado, evidenciando que el análisis de vibraciones mecánicas posee mayor sensibilidad ante anomalías cinemáticas de desalineación angular, en comparación con el ultrasonido pasivo.
- Se estableció una contribución metodológica original al comprobar que el ultrasonido pasivo resulta una técnica diagnóstica superior y exclusiva para el monitoreo del desgaste severo de los flancos, debido a que el incremento de la presión sonora global NPT es sensible a la fricción abrasiva continua.
- Finalmente, el análisis espectral en el dominio del tiempo permitió validar el comportamiento transitorio ante la rotura de un diente mediante el cálculo preciso de frecuencias de choque unificadas, lo que consolida un marco de referencia robusto para prevenir fallas catastróficas imprevistas en la industria.

6. Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con el artículo presentado.

7. Derechos de autor (copyright)

Los autores son los titulares de los derechos de autor (patrimoniales y/o de explotación) de los contenidos de la revista (*copyright*).

8. Declaración de contribución de los autores

Los autores declaran haber participado de manera equitativa y sustancial en la realización de esta investigación, bajo las responsabilidades según la [Taxonomía CRediT](#) para describir las contribuciones individuales de cada autor al trabajo.

[Conceptualización](#): Hernández-Dávila, E., Gallegos-Londoño, C., & Alarcón-Arévalo, C.

[Curación de datos](#): Hernández-Dávila, E., Gallegos-Londoño, C., & Alarcón-Arévalo, C.

[Análisis formal](#): Hernández-Dávila, E., Gallegos-Londoño, C., & Alarcón-Arévalo, C.

[Adquisición de fondos](#): Hernández-Dávila, E., Gallegos-Londoño, C., & Alarcón-Arévalo, C.

[Investigación](#): Hernández-Dávila, E., Gallegos-Londoño, C., & Alarcón-Arévalo, C.

[Metodología](#): Hernández-Dávila, E., Gallegos-Londoño, C., & Alarcón-Arévalo, C.

[Administración del proyecto](#): Hernández-Dávila, E., Gallegos-Londoño, C., & Alarcón-Arévalo, C.

[Recursos](#): Hernández-Dávila, E., Gallegos-Londoño, C., & Alarcón-Arévalo, C.

[Software](#): Hernández-Dávila, E., Gallegos-Londoño, C., & Alarcón-Arévalo, C.

[Supervisión](#): Hernández-Dávila, E., Gallegos-Londoño, C., & Alarcón-Arévalo, C.

[Validación](#): Hernández-Dávila, E., Gallegos-Londoño, C., & Alarcón-Arévalo, C.

[Visualización](#): Hernández-Dávila, E., Gallegos-Londoño, C., & Alarcón-Arévalo, C.

Escritura borrador original: Hernández-Dávila, E., Gallegos-Londoño, C., & Alarcón-Arévalo, C.

Redacción revisión y edición: Hernández-Dávila, E., Gallegos-Londoño, C., & Alarcón-Arévalo, C.

Discusión de resultados: todos los autores participaron activamente en el análisis crítico e interpretación de los hallazgos presentados.

Revisión y aprobación: todos los autores revisaron minuciosamente el manuscrito, realizaron las correcciones pertinentes y otorgaron su aprobación formal para la versión final del trabajo.

Divulgación de la delegación a la IA generativa

La responsabilidad del manuscrito final recae íntegramente en los autores.

Las herramientas GAI no figuran como autores y no asumen responsabilidad por los resultados finales.

Declaración presentada por: Hernández-Dávila, E.

9. Costos de financiamiento

La presente investigación fue financiada en su totalidad con fondos propios de los autores.

10. Referencias bibliográficas

- Arsić, D., Nikolić, R., Arsić, A., Cvetković, D., Bokuvka, O., & Mandić, V. (2026). Root cause assessment of welded satellite gear carrier failure in a bucket wheel excavator. *Production Engineering Archives*, 32(2), 230–240. <https://doi.org/10.30657/pea.2026.32.19>
- Bonilla-Angulo, F., Castelão, T., Chastel, Y., Dean, F. W. H., Gardner, C. E., & Lecuyer, G. (2026). Assessing the impact of carbonitriding on residual weld hydrogen in the manufacture of a gear component. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 21(1). <https://doi.org/10.1186/s40712-026-00414-z>
- Chen, B., Shen, Q., Zhang, Y., Li, X., Cai, J., Sun, X., & Chen, Z. (2026). Mechanism analysis and optimisation strategy for the impact of gear oil cleanliness on the service life of wind turbine gearboxes. *Journal of Engineering and Applied Science*, 73(1). <https://doi.org/10.1186/s44147-026-01062-y>
- Condemaita Quilligana, J. A., & Molano Tobar, C. S. (2022). *Implementación de un módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de fallas en engranajes para el rotor kit del laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/16220>
- Delgado Barrera, M. A. (2020). *Diseño y construcción de kits de prueba para diagnosticar fallas en engranajes de máquinas rotativas* [Tesis de grado, Universidad Autónoma de Bucaramanga]. <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/12162>

- Elizegi Aiertza, J., Larrañaga Amilibia, J., Arana, A., Izquierdo Ortiz de Landaluze, M., & Ulacia, I. (2023). *Evolución de la fatiga superficial en engranajes de acero al carbono* [XXIV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica].
<https://research.science.eus/documentos/6644dce643fb2b008f1002f7>
- Ferreira de Oliveira, B., Alves Pessanha, A., & Hernandez Terrones, L. A. (2020). Análisis de la falla reincidente en un engranaje helicoidal. *Revista Perspectivas Online: Exatas & Engenharia*, 10(27), 27–41.
<https://doi.org/10.25242/885x102720201952>
- García Mora, F. A., Escobar Chávez, J. L., Gallegos Londoño, C. M., & Hernández Dávila, E. S. (2023). El enfoque de aprendizaje conjunto en la detección de fallas en cajas de engranajes. *Universidad y Sociedad*, 15(3), 325–333.
<https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/3751>
- Hernández-Dávila, E., Olivo Malliquinga, D. F., & Carrillo Villa, C. A. (2020). Estudio de la eficacia de la toma de medidas de vibraciones mecánicas sobre superficies irregulares y no rígidas. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 9(1), 93–98. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.2426>
- Loaiza Sánchez, W. F. (2021). *Detección y diagnóstico de fallos de caja de engranajes rectos utilizando un algoritmo de clasificación basado en similaridad difusa aplicado en señales de vibración* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21212>
- Mejía Correa, M. V. (2022). *Diagnóstico del nivel de severidad de fallo de diente roto en engranajes rectos usando algoritmos de aprendizaje automático y gráficas de Poincaré aplicados a la señal de par eléctrico de un motor de inducción* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana].
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23479>
- Mena Chavarrea, J. M., Antonio Granizo, J., Hernández Dávila, E. S., & Audelo Guevara, M. E. (2023). Cálculo de la velocidad de desgaste abrasivo en engranajes de dientes rectos y helicoidales con perfil evolvente, utilizando una GUI de Matlab. *Ingenius - Revista de Ciencia y Tecnología*, (29), 32–45.
<https://doi.org/10.17163/ings.n29.2023.03>
- Moya Rodriguez, J. L., Abreu Ruano, G., Goytisol Espinosa, R., Bernal-Aguilar, Y., Fírvida-Donéstevéz, E. M., Machado Rodríguez, Á., Rivera Peña, Y., Camarillo Montero, J. A., & Leyva Retureta, J. G. (2014). Bancos de prueba para el ensayo de transmisiones por engranajes [VIII Conferencia Científica Internacional de Ingeniería Mecánica (COMEC)] https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Moya-Rodriguez/publication/282134923_Bancos_de_prueba_para_el_ensayo_de_transmisiones_por_engranajes/data/560464fd08aeb5718feff410/Bancos-de-prueba-para-el-ensayo-de-transmisiones-por-engranajes.pdf
- Ortega Lucero, L. R. (2021). *Estimación del par de carga en motores de inducción basado en su modelo matemático y orientado a la detección de fallos en cajas de*

- engranajes* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana].
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20314>
- Sacmaozu Kalfaoglu, G., Dursun, A. B., & Pehlivanoglu, Y. (2026). A review of gear failure analysis: classification, inspection methods, and literature-based case studies. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 26(2), 678–714.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11668-026-02379-9>
- San Martín, C., Estupiñán, E., & San Martín, D. (2010). A methodology for the detection and diagnostic of localized faults in gears and rolling bearings systems. *Ingeniare - Revista Chilena de Ingeniería*, 18(1), 44–52.
<https://www.redalyc.org/pdf/772/77218811006.pdf>
- Sánchez Loja, R. V. (2018). *Diagnóstico de fallos en cajas de engranajes con base en la fusión de datos de señales de vibración, corriente y emisión acústica* [Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana].
<https://repository.upb.edu.co/items/9a88bb14-b5e9-463f-ad3c-16cae3c2744e>
- Triola, M. F. (2018). *Estadística* (12da ed.). Pearson Educación.
https://www.academia.edu/44058808/Estadistica_Mario_F_Triola_12ED
- Tutasig Macias, A. A., & Taranto González, E. D. P. (2024). Análisis de vibraciones en maquinaria rotativa: diagnóstico de fallas y estrategias de mantenimiento predictivo. *Revista Social Fronteriza*, 4(4), e44365.
[https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4\(4\)365](https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4(4)365)
- Verucchi, C. J., Bossio, G. R., Bossio, J. M., & Acosta, G. G. (2015). Detección de fallas en reductores a engranajes impulsados por motores de inducción: un estudio experimental. *XVI Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control*. https://www.researchgate.net/profile/Guillermo-Bossio/publication/328201945_Deteccion_de_fallas_en_reductores_a_engranajes_impulsados_por_motores_de_induccion_un_estudio_experimental/links/5bbe3b9b92851c4efd561dd0/Deteccion-de-fallas-en-reductores-a-engranajes-impulsados-por-motores-de-induccion-un-estudio-experimental.pdf
- Villanueva-Rodríguez, J. A., Barreto-Reyes, N. S., & Calero-Arellano, D. P. (2022). Modelo vibratorio de un sistema de transmisión de potencia para detección y caracterización de fallas. *Revista Ontare*, 9, 85-108.
<https://doi.org/10.21158/23823399.v9.n0.2021.3336>
- Zuñiga Uribe, M. (2023). *Análisis de fractura en dientes de engranes de transmisiones automotrices mediante vibraciones* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Querétaro]. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/8941>

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Alfa Publicaciones**.



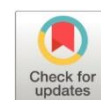
El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Alfa Publicaciones**.



Modelo comparativo de la ecuación de calor unidimensional: perspectivas deterministas y estocásticas

One-dimensional heat equation comparative model: deterministic and stochastic perspectives

- ¹ Brighth Magdalena Jiménez Tillaguango  <https://orcid.org/0009-0000-6282-9031>
Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), Riobamba, Ecuador.
Maestría en Matemática Aplicada con mención en Matemática Computacional
brighth.jimenez@unach.edu.ec
- ² Lidia del Rocio Castro Cepeda  <https://orcid.org/0000-0002-0471-2879>
Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), Riobamba, Ecuador.
Máster Universitario en Ingeniería Matemática y Computación
lidia.castro@unach.edu.ec



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 12/05/2026

Revisado: 13/06/2026

Aceptado: 08/07/2026

Publicado: 28/07/2026

DOI: <https://doi.org/10.33262/ap.v8i3.701>

Cítese:

Jiménez Tillaguango, B. M. ., & Castro Cepeda, L. del R. (2026). Modelo comparativo de la ecuación de calor unidimensional: perspectivas deterministas y estocásticas. AlfaPublicaciones, 8(3), 43–69. <https://doi.org/10.33262/ap.v8i3.701>



ALFA PUBLICACIONES, es una revista multidisciplinar, **trimestral**, que se publicará en soporte electrónico tiene como **misión** contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://alfapublicaciones.com>
La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec

Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons Attribution Non Commercial No Derivatives 4.0 International. Copia de la licencia: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Palabras claves:

Ecuación del calor,
ecuaciones
diferenciales
parciales,
procesos
estocásticos,
ruido blanco,
método de Monte
Carlo.

Resumen

Introducción: la incorporación de incertidumbre en los modelos de conducción de calor permite representar perturbaciones aleatorias presentes en diversos procesos físicos.

Objetivos: la presente investigación se plantea como objetivo comparar las formulaciones determinista y estocástica de la ecuación del calor unidimensional bajo ruido blanco gaussiano aditivo y analizar la influencia de la difusividad térmica en la propagación de la incertidumbre. **Metodología:** se implementó una simulación computacional validada y reproducible para ecuaciones diferenciales parciales estocásticas en el software MATLAB, considerando un modelo determinista mediante esquema de Crank- Nicolson y una formulación estocástica mediante el método Euler-Maruyama. La incertidumbre se modeló con ruido blanco gaussiano aditivo y se evaluó mediante 200 simulaciones Monte Carlo en aluminio, acero inoxidable y madera. Se emplearon como métricas el RMSE, la varianza máxima y la energía térmica promedio. **Resultados:** la media del ensamblaje Monte Carlo presentó una elevada concordancia con la solución determinista. El incremento de la intensidad del ruido aumentó la dispersión estadística, mientras que la energía térmica promedio permaneció prácticamente constante. **Conclusiones:** en conclusión, la difusividad térmica actúa como un mecanismo natural de amortiguamiento de la incertidumbre, afectando principalmente la variabilidad de la solución sin modificar significativamente la dinámica promedio del proceso difusivo. **Área de estudio general:** Matemática Aplicada. **Área de estudio específica:** Simulación computacional. **Tipo de estudio:** Artículos originales.

Keywords:

Heat equation,
partial differential
equations,
stochastic
processes,
white noise,
Monte Carlo
method.

Abstract

Introduction: the incorporation of uncertainty in heat conduction models allows us to represent random perturbations present in various physical processes. **Objectives:** the objective of this research is to compare the deterministic and stochastic formulations of the one-dimensional heat equation under additive Gaussian white noise and to analyze the influence of thermal diffusivity on the propagation of uncertainty. **Methodology:** a validated and reproducible computational simulation for stochastic partial differential equations was

implemented in the MATLAB software, considering a deterministic model using the Crank-Nicolson scheme and a stochastic formulation using the Euler-Maruyama method. Uncertainty was modeled with additive Gaussian white noise and evaluated using 200 Monte Carlo simulations in aluminum, stainless steel, and wood. RMSE, maximum variance, and average thermal energy were used as metrics. **Results:** the means of the Monte Carlo assembly showed a high agreement with the deterministic solution. The increase in noise intensity increased the statistical dispersion, while the average thermal energy remained practically constant. **Conclusions:** in conclusion, thermal diffusivity acts as a natural uncertainty dampening mechanism, mainly affecting the variability of the solution without significantly modifying the average dynamics of the diffusive process. **General area of study:** Applied Mathematics. **Specific area of study:** Computational simulation. **Type of study:** Original articles.

1. Introducción

La transferencia de calor por conducción constituye uno de los procesos físicos fundamentales en la ingeniería, debido a la participación en sistemas energéticos, procesos industriales, materiales estructurales, dispositivos electrónicos y aplicaciones de manufactura avanzada. La capacidad de describir y predecir la evolución espacial y temporal de la temperatura es esencial para el diseño eficiente de sistemas térmicos y para la evaluación del comportamiento de materiales sometidos a diferentes condiciones operativas (Bergman et al., 2019; Ghajar & Çengel, 2025).

La modelación matemática de la conducción térmica se fundamenta en la ecuación clásica del calor, derivada a partir de la ley de Fourier y del principio de conservación de la energía. En una dimensión espacial, dicha **Ecuación 1** puede expresarse como:

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

Donde $u(x,t)$ = temperatura en posición x y tiempo t ; $\frac{\partial u(x,t)}{\partial t}$ = tasa de cambio de la temperatura en el tiempo; α = coeficiente de difusión térmica; $\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \partial_{xx}u$ es la segunda derivada espacial, que mide la curvatura de la distribución de temperatura: Si $\partial_{xx}u > 0$ la curva es cóncava hacia arriba, es decir, existe una tendencia a aumentar. Si

$\partial_{xx}u < 0$ la curva es cóncava hacia abajo, es decir, existe una tendencia a disminuir (Anton et al., 2017).

Este parámetro relaciona la capacidad de conducción y almacenamiento de energía térmica, determinando la rapidez con que una perturbación térmica se propaga a través del medio (Evans, 2022; Bergman et al., 2019).

A pesar del amplio desarrollo teórico y numérico alcanzado por la ecuación del calor, los sistemas físicos reales se encuentran expuestos a múltiples fuentes de incertidumbre, entre las que destacan las fluctuaciones ambientales, los errores de medición, las variaciones en las propiedades de los materiales y las perturbaciones operacionales. Estas fuentes de incertidumbre limitan la capacidad predictiva de los modelos deterministas clásicos, generando discrepancias entre las predicciones teóricas y el comportamiento observado experimentalmente (Sterr et al., 2021; Li & Su, 2022; Seyer et al., 2024).

Con el propósito de incorporar dichos efectos aleatorios, durante las últimas décadas ha surgido un creciente interés por las ecuaciones diferenciales parciales estocásticas (SPDE, por sus siglas en inglés), las cuales incorporan términos probabilísticos capaces de representar perturbaciones espaciales y temporales de naturaleza aleatoria. Entre ellas, la ecuación de calor estocástica constituye uno de los modelos más estudiados debido a su relevancia teórica y a sus aplicaciones en transferencia de calor, dinámica de fluidos, propagación de contaminantes, crecimiento de interfaces y fenómenos de difusión en medios aleatorios (Anton et al., 2017; Dong et al., 2025; Khattab et al., 2024; Guzmán & Alvear, 2021; Azorin & Yaulema, 2021).

Una de las formulaciones más utilizadas corresponde al caso de ruido blanco gaussiano aditivo, modelado mediante la incorporación de un proceso de Wiener (**Ecuación 2**):

$$\text{Wiener (W(t))}: \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + \sigma dW \quad (2)$$

donde σ representa la intensidad de las perturbaciones aleatorias. En esta formulación, el ruido actúa de forma independiente del estado térmico del sistema, introduciendo fluctuaciones externas que afectan uniformemente la dinámica de la solución (Kloeden & Platen, 1992; Lord & Tambue, 2018).

Desde el punto de vista computacional, la resolución de SPDE representa un desafío considerable debido a la coexistencia de fenómenos deterministas y aleatorios en múltiples escalas espaciales y temporales. Como consecuencia, gran parte de la investigación reciente se ha orientado al desarrollo de métodos numéricos robustos que garanticen estabilidad, convergencia y precisión estadística (Esmaeilbeigi et al., 2019).

Entre los enfoques más utilizados destacan los métodos de diferencias finitas, elementos finitos, técnicas espectrales y formulaciones híbridas adaptadas a la naturaleza probabilística de las SPDE (Anton et al., 2017; Dong et al., 2025).

Para la discretización del término difusivo, el esquema implícito de Crank-Nicolson continúa siendo una de las estrategias más empleadas debido a su estabilidad y precisión de segundo orden en espacio y tiempo (Crank & Nicolson, 1947). Por otra parte, la discretización del término estocástico suele realizarse mediante el método de Euler-

Maruyama, considerado la extensión natural del método de Euler para ecuaciones diferenciales estocásticas y ampliamente utilizado para la aproximación de integrales de Itô (Kloeden & Platen, 1992; Bogoi et al., 2023).

Asimismo, la cuantificación de la incertidumbre asociada a las soluciones estocásticas requiere procedimientos estadísticos capaces de caracterizar la variabilidad introducida por el ruido. Entre las metodologías más empleadas destaca la simulación Monte Carlo, la cual permite generar múltiples realizaciones independientes del proceso aleatorio para estimar métricas estadísticas, tales como la media del ensamblaje, la varianza espacial y el error respecto a una solución determinista de referencia (Sterr et al., 2021; Zhang & Li, 2023).

Investigaciones recientes han profundizado en el desarrollo de esquemas numéricos estructuralmente conservativos y técnicas orientadas a reducir el costo computacional de las SPDE. Dong et al. (2025) desarrollaron un enfoque de diferencias finitas de orden reducido para ecuaciones semilineales impulsadas por ruido blanco, mientras que Khattab et al. (2024) exploraron el uso de transformadas rápidas de Fourier para acelerar la resolución de ecuaciones de calor estocásticas. Asimismo, Cîmpean et al. (2026) analizaron propiedades asintóticas de soluciones asociadas a ecuaciones de calor semilineales.

Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones se concentra en aspectos teóricos relacionados con la convergencia, la estabilidad o la preservación estructural de los métodos numéricos, sin profundizar en la influencia que ejercen las propiedades físicas de los materiales sobre la propagación de la incertidumbre térmica. De forma paralela, los estudios aplicados de transferencia de calor bajo incertidumbre suelen orientarse hacia sistemas complejos, micro canales o medios radiactivos (Li & Su, 2022; Sterr et al., 2021; Seyer et al., 2024), existiendo un número limitado de investigaciones dedicadas a cuantificar comparativamente el efecto de la difusividad térmica sobre la respuesta estadística de modelos estocásticos unidimensionales (Navas et al., 2022; Elizalde et al., 2024; Benítez et al., 2025).

Esta brecha resulta particularmente relevante debido a que la difusividad térmica no solo regula la velocidad de disipación del calor, sino también la capacidad del material para amortiguar las fluctuaciones inducidas por perturbaciones aleatorias (Adamowicz, 2022). En consecuencia, la caracterización cuantitativa de la relación entre las propiedades térmicas del material y la propagación de la incertidumbre constituye un problema de interés tanto científico como ingenieril. En particular, existe una limitada evidencia cuantitativa sobre la influencia de la difusividad térmica en la propagación de la incertidumbre en modelos unidimensionales de conducción de calor sujetos a ruido blanco gaussiano aditivo, lo que dificulta comprender el papel de las propiedades físicas del material en la respuesta estadística del sistema.

A diferencia de estudios centrados en el desarrollo de nuevos esquemas numéricos para ecuaciones del calor estocásticas, este trabajo cuantifica comparativamente el efecto de

la difusividad térmica sobre la propagación de la incertidumbre bajo ruido blanco gaussiano aditivo. En este contexto, el presente trabajo desarrolla un análisis numérico comparativo de la ecuación de calor unidimensional bajo dos escenarios: un modelo determinista clásico y un modelo estocástico con ruido blanco gaussiano aditivo. La comparación se realiza considerando materiales con diferentes coeficientes de difusividad térmica (aluminio, acero inoxidable y madera) y distintos niveles de intensidad del ruido, con el propósito de analizar cómo las propiedades térmicas influyen en la propagación de la incertidumbre.

La investigación se fundamenta en la hipótesis de que la incorporación de perturbaciones estocásticas incrementa la dispersión estadística de la solución térmica respecto al modelo determinista y que este efecto depende de la difusividad térmica del material, siendo más pronunciado en materiales con menor capacidad de disipación.

Para contrastar esta hipótesis, se emplea una metodología basada en diferencias finitas, discretización de Crank-Nicolson para el término difusivo, integración estocástica mediante el método de Euler-Maruyama y simulaciones Monte Carlo para la cuantificación de la incertidumbre.

Por consiguiente, el objetivo de la investigación es comparar las formulaciones determinista y estocástica con ruido blanco gaussiano aditivo de la ecuación del calor unidimensional mediante simulación numérica, evaluando su efecto sobre métricas de error, energía y variabilidad estadística en materiales con diferentes propiedades de difusión térmica. Los resultados obtenidos aportan evidencia cuantitativa sobre el papel de la incertidumbre en los procesos de conducción de calor y contribuyen al desarrollo de metodologías de simulación estocástica aplicables a problemas de ingeniería térmica y modelación matemática bajo incertidumbre.

2. Metodología

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de nivel explicativo y comparativo, mediante un diseño cuasi – experimental computacional orientado al análisis de propagación de incertidumbre en sistemas de conducción térmica unidimensional.

Este diseño fue seleccionado debido a que permite manipular de forma controlada variables físicas y estocásticas, evaluando su influencia sobre la estabilidad, dispersión y capacidad predictiva de soluciones numéricas sujetas a perturbaciones aleatorias.

Asimismo, el estudio se clasifica como una investigación aplicada de simulación numérica, ya que emplea modelos matemáticos y algoritmos computacionales para reproducir fenómenos físicos de transferencia de calor bajo condiciones controladas de incertidumbre permitiendo analizar escenarios cuya validación experimental resulta compleja o costosa.

La investigación se estructuró mediante dos escenarios experimentales: modelo determinista de referencia y modelo estocástico con ruido blanco.

Como variables independientes se definieron la intensidad del ruido estocástico (σ), la perturbación aleatoria y la difusividad térmica del material (α). Las variables dependientes evaluadas incluyeron el Error Cuadrático Medio (RMSE) espacio – temporal, la varianza espacial, el coeficiente de variación, la energía térmica discreta y la estabilidad numérica temporal. El RMSE se calculó mediante la expresión (**Ecuación 3**):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (u_i - u_i^{ref})^2} \quad (3)$$

donde N_x representa el número de nodos espaciales, u_i representa la solución estocástica promedio y u_i^{ref} la solución determinista de referencia (Villasante et al., 2025). Por su parte, la energía térmica del sistema se evaluó mediante la integral (**Ecuación 4**):

$$E(t) = \int_{\Omega} u^2(x, t) dx \quad (4)$$

cuya aproximación se efectuó utilizando la integración discreta sobre la malla espacial (Li & Su, 2022).

2.1. Población de estudio, muestra y criterios de selección

En el contexto físico-computacional del estudio, la población estuvo conformada por materiales sólidos isotrópicos susceptibles de ser modelados mediante conducción térmica unidimensional. Se empleó un muestreo intencional no probabilístico, seleccionando tres materiales con capacidades difusivas contrastantes: aluminio (alta difusividad), acero inoxidable (difusividad media) y madera (baja difusividad) (Bergman et al., 2019). La selección de estos materiales permitió cubrir distintos regímenes de propagación térmica, favoreciendo el análisis comparativo del efecto de las perturbaciones estocásticas sobre materiales con velocidades de difusión contrastantes. Los criterios de inclusión exigieron propiedades térmicas constantes, isotropía material, comportamiento lineal de conducción y ausencia de cambios de fase en el rango analizado. Se excluyeron sistemáticamente materiales anisótropos, medios no homogéneos y sistemas con dependencia no lineal de la temperatura.

Para el análisis estadístico del comportamiento estocástico, la muestra computacional se definieron 200 simulaciones independientes de Monte Carlo por cada configuración experimental. Este tamaño muestral se determinó tras pruebas piloto que confirmaron la estabilización estadística de la media del ensamblaje, la varianza y la convergencia del RMSE. Al fundamentarse exclusivamente en simulaciones numéricas, esta investigación no involucra seres humanos ni animales, prescindiendo de la aprobación de un comité de ética y del consentimiento informado.

2.2. Modelo matemático

El fenómeno de transferencia de calor se modeló sobre una barra unidimensional de longitud L , donde la variable espacial x representa la posición a lo largo del dominio físico y satisface $x \in [0, L]$. Para ello, se parte de la **Ecuación 5** clásica unidimensional

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} \quad (5)$$

donde $u(x, t)$ representa la temperatura espacial y temporal (Anton et al., 2017). Para incorporar la incertidumbre térmica se introdujo un proceso de Wiener $W(t)$ representada matemáticamente como la acción del ruido blanco integrado en el tiempo.

El modelo principal, fundamentado con ruido aditivo, se define como **Ecuación 6**:

$$du = \alpha \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} + \sigma dW \quad (6)$$

Sujeto a: $u(0, t) = u(L, t) = 0$ y $u(x, 0) = u_0(x)$, donde σ controla la intensidad de las fluctuaciones aleatorias (Lord & Tambue, 2018).

2.3. Dominio computacional y discretización numérica

El dominio espacial se limitó a $x \in [0, 1]$ y el intervalo temporal a $t \in [0, 0.5]$. Para observar los procesos de disipación se definió una condición inicial de perfil gaussiano suave $u(x, 0) = \exp(-50(x - 0.5)^2)$, sujeto a condiciones de frontera de Dirichlet homogéneas ($u(0, t) = 0$ y $u(L, t) = 0$) para garantizar la estabilidad física del sistema. La discretización espacial se realizó mediante diferencias finitas centrales de segundo orden sobre una malla uniforme $\Delta x = 10^{-2}$ (LeVeque, 2007). El sistema determinista se resolvió empleando el esquema implícito de Crank – Nicolson debido a su estabilidad incondicional y adecuada conservación energética (Crank & Nicolson, 1947). En contraste, la discretización temporal de los modelos estocásticos se efectuó mediante el método de Euler – Maruyama. El esquema iterativo se estructuró bajo la perspectiva de Lord & Tambue (2018), como **Ecuación 7**:

$$U^{n+1} = U^n + \Delta t A_h U^n + \sigma \Delta W_n \quad (7)$$

Los incrementos del proceso de Wiener se aproximaron mediante $\Delta W_n \approx \sqrt{\Delta t} \eta_n$, donde $\eta_n \sim \mathcal{N}(0, 1)$, esto es consistente con la definición probabilística del proceso de Wiener y constituye la base del método de Euler – Maruyama (Kloeden & Platen, 1992). Aunque el esquema de Crank-Nicolson es incondicionalmente estable, se seleccionó un paso temporal de $\Delta t = 5 \times 10^{-5}$ para asegurar una adecuada resolución de las fluctuaciones estocásticas y reducir los errores de discretización temporal.

2.4. Resolución numérica del modelo

Lord & Tambue (2018) recomienda la integración temporal del modelo estocástico, se realizó mediante el esquema semi implícito de Euler – Maruyama implementado en la función: `solver_stochastic_EM.m`. El esquema numérico empleado puede expresarse como **Ecuación 8**:

$$U^{\{n+1\}} = (I - \Delta t A_h)^{-1} (U^n + \mathcal{G}(U^n) \Delta W_n) \quad (8)$$

Los incrementos de Wiener fueron generados mediante $\Delta W_n \sim \mathcal{N}(0, \Delta t)$, utilizando variables gaussianas independientes. Para el caso del ruido aditivo, el término estocástico implementado fue $\mathcal{G}(U^n) \Delta W_n = \sigma \Delta W_n$. La resolución matricial del sistema lineal se optimizó mediante factorización LU pre computada (Ermakov & Smilovitsky, 2021), reduciendo significativamente el costo computacional durante las simulaciones Monte Carlo.

2.5. Arquitectura computacional y secuencialidad de la simulación

La arquitectura computacional fue implementada de forma modular en MATLAB para garantizar reproducibilidad, trazabilidad experimental y separación funcional entre discretización, resolución numérica y análisis estadístico.

La simulación completa fue controlada mediante el script principal: *run_all.m*; encargado de controlar todas las etapas del experimento computacional. Este archivo como núcleo de la simulación, ejecutando de forma secuencial la carga de parámetros, construcción de la malla, generación de condiciones iniciales, resolución de los modelos determinista y estocástico, ejecución de los experimentos Monte Carlo y almacenamiento de resultados. La simulación inicia con la definición del conjunto de materiales de estudio, incluyendo aluminio, acero inoxidable y madera. Para cada material se ejecuta automáticamente el archivo *params.m*, donde se incorporan las propiedades físicas del medio, tales como: conductividad térmica (κ), densidad (ρ) y calor específico (c_p) (Bergman et al., 2019). A partir de estos parámetros se calcula α la difusividad térmica mediante **Ecuación 9**:

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho c_p} \quad (9)$$

Asimismo, en este archivo se definen todos los parámetros globales del experimento, incluyendo la longitud del dominio (L), el tiempo final de la simulación (T), los tamaños de discretización espacial y temporal (Δx y Δt), el conjunto de intensidades de ruido estudiadas (σ), el número de realizaciones de Monte Carlo (N_{MC}), las semillas de reproducibilidad, los criterios de almacenamiento de resultados y las opciones de validación numérica.

Una vez definidos los parámetros globales, el script *build_grid.m* construye la malla espacio-temporal uniforme utilizado por todos los experimentos. Este procedimiento discretiza el dominio espacial ($x[0, L]$) y el intervalo temporal ($t[0, T]$), generando una estructura de datos que contiene vectores espaciales y temporales, el número total de nodos (N_x), el número de pasos temporales (N_t), los índices interiores y la información necesaria para aplicar las condiciones de contorno.

Posteriormente, la función *init_condition.m* general la distribución térmica inicial utilizada en simulaciones. En el presente estudio se empleó un perfil gaussiano centrado en el dominio: $A \exp[-\beta(x - x_0)^2]$, donde (A) representa la amplitud inicial, β controla el ancho de la distribución y $x - x_0$ determina la ubicación del máximo térmico. Simultáneamente se imponen las condiciones de frontera Dirichlet homogéneas, fijando la temperatura en ambos extremos de la barra.

A continuación, el archivo *assemble_Ah.m* construye el operador Laplaciano discreto asociado a la segunda derivada espacial mediante diferencias finitas centrales de segundo orden. Este procedimiento genera una matriz tridiagonal dispersa que representa el operador de difusión térmica discretizado y constituye el núcleo algebraico utilizado tanto por el modelo determinista como por el estocástico.

Una vez ensamblado el operador espacial, el problema determinista es resuelto mediante la función *solver_deterministic_CN.m* la cual implementa el esquema implícito de Crank-Nicolson para la ecuación de conducción de calor.

La solución obtenida constituye la referencia numérica frente a la cual posteriormente se comparan los resultados estocásticos. Durante este proceso se calculan métricas asociadas a la evolución temporal de la energía, amplitud máxima y estabilidad de la solución.

Finalizada la simulación determinista, se ejecuta el procedimiento Monte Carlo mediante la función *montecarlo_runner.m*. Este módulo coordina la generación de múltiples trayectorias independientes del modelo estocástico para cada intensidad de ruido considerada. Con el objetivo de garantizar independencia estadística, cada realización utiliza una semilla distinta derivada de una semilla maestra definida previamente en el archivo de parámetros.

Cada trayectoria individual es resuelta mediante la función *solver_stochastic_EM.m*, la cual implementa un esquema Euler – Maruyama implícito para la ecuación de calor estocástica. El código permite analizar la formulación de incertidumbre: ruido aditivo, donde (dW) representa los incrementos discretos del proceso de Wiener aproximados mediante variables aleatorias gaussianas independientes.

Durante la ejecución Monte Carlo se implementa internamente el algoritmo de Welford, el cual permite calcular de manera incremental y numéricamente estable la media y la varianza del ensamblaje si necesidad de almacenar simultáneamente todas las realizaciones generadas. Este procedimiento reduce significativamente el consumo de memoria y minimiza errores de redondeo asociados a la acumulación masiva de datos (Welford, 1962).

A partir de las realizaciones obtenidas se calculan diversas métricas estadísticas de interés, incluyendo la media espacio – temporal, la varianza, la desviación estándar, el coeficiente de variación, los intervalos de confianza del 95 %, la energía térmica promedio y el Error Cuadrático Medio (RMSE) respecto a la solución determinista.

El análisis posterior de resultados se realiza mediante el módulo *postprocess_plot.m*, encargado de generar perfiles especiales, mapas de calor espacio – temporales, curvas de evolución energética y representaciones gráficas de bandas de incertidumbre asociadas a las simulaciones estocásticas.

Paralelamente al flujo principal de simulación, se desarrolló una segunda cadena computacional destinada exclusivamente a la validación matemática y estadística del modelo. Esta etapa es coordinada por el script *run_all_validation.m* encargado de ejecutar automáticamente todos los estudios de convergencia y consistencia numérica utilizados para verificar la fiabilidad de los resultados reportados. La validación se organiza en varias etapas secuenciales, detalladas a continuación:

La primera etapa consiste en la validación determinista mediante solución exacta, la cual, consiste en verificar el correcto funcionamiento del esquema de Crank – Nicolson implementado en *solver_deterministic_CN.m*. Para ello se utiliza el script

validation_deterministic.m, el cual reemplaza la condición inicial gaussina con una condición inicial senoidal $u(x, 0) = A \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right)$ debido a que esta formulación posee una solución analítica conocida para la ecuación clásica del calor (Evans, 2022).

La solución exacta se obtiene mediante la función *exact_solution_heat.m*, la cual implementa **Ecuación 10**:

$$u(x, t) = A \exp\left[-\alpha \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 t\right] \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (10)$$

Esta solución se evalúa sobre la misma malla espacio- temporal utilizada para el solver numérico (Ogethakpo & Nkonyeasya, 2025).

Posteriormente se calcula la diferencia entre la solución exacta y la solución numérica obtenida mediante Crank-Nicolson, determinándose: Error absoluto, Error máximo, Norma L_2 y Error relativo. Esta comparación constituye la primera evidencia de consistencia matemática del esquema implementado.

La segunda etapa consiste en el estudio de convergencia espacial, una vez validado el solver determinista el script *study_spatial_convergence.m* analiza el comportamiento del error al refinar progresivamente la discretización espacial. Para ello, se ejecutan múltiples simulaciones utilizando distintos tamaños de malla: $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \dots$. Para cada discretización se calcula el error respecto a la solución exacta y posteriormente se estima el orden experimental de convergencia: $e_h = Ch^p$, donde p representa el orden espacial observado. El objetivo es verificar que el esquema de diferencias finitas centrales reproduce el comportamiento teórico de segundo orden: $p \approx 2$.

Posteriormente, la segunda validación numérica es ejecutada mediante *study_temporal_convergence.m*, en este procedimiento se mantiene fija la discretización espacial y se realizan simulaciones utilizando distintos valores de Δt . Para cada caso se calcula nuevamente el error frente a la solución analítica y se estima el orden temporal $e_{\Delta t} = C(\Delta t)^q$. El objetivo es verificar experimentalmente que el esquema de Crank-Nicolson presenta convergencia temporal de segundo orden: $q \approx 2$ (Crank & Nicolson, 1947).

A continuación, se realiza la validación estocástica del modelo de ruido blanco que es evaluada mediante el script *study_stochastic_validation.m*. En esta etapa se generan múltiples realizaciones independientes de la ecuación de calor estocástica utilizando el esquema Euler – Maruyama. El análisis permite verificar estabilidad estadística de la media; crecimiento esperado de la varianza; comportamiento de la energía térmica promedio; ausencia de trayectorias numéricamente divergentes y consistencia de los intervalos de confianza. Esta prueba constituye una validación empírica del comportamiento probabilístico del modelo.

La convergencia fuerte y convergencia débil se analiza en el *script study_strong_weak_convergence.m* evalúa los órdenes de convergencia característicos del método de Euler – Maruyama. Para ello se comparan simulaciones realizadas con

distintos pasos temporales utilizando trayectorias de Wiener consistente entre mallas (Bayer et al., 2024).

Se calcula el error fuerte $E[|X(T) - X_h(T)|]$, y el error débil $|E[X(T)] - E[X_h(T)]|$. La teoría predice $Error\ fuerte = O(\Delta t^{\frac{1}{2}})$ y $Error\ debil = O(\Delta t)$, por lo que la validación busca verificar experimentalmente dichas tasas de convergencia (Higham, 2001).

La estabilidad estadística del ensamblaje es estudiada mediante *study_MC_convergence.m*. Se realizan simulaciones utilizando diferentes cantidades de realizaciones. $N_{MC} = 50, 100, 200, 500, 1000, \dots$. Analizando la evolución de la media muestral, varianza, RMSE e intervalos de confianza. Teóricamente, el error Monte Carlo debe disminuir como $O\left(N_{MC}^{-\frac{1}{2}}\right)$, por lo que esta prueba permite justificar el tamaño

muestral seleccionado para el estudio (Kroese et al., 2011).

El script *study_confidence_intervals.m* evalúa la evolución de los intervalos de confianza del 95 % obtenidos a partir de las simulaciones Monte Carlo. Se verifica que el aumento del número de realizaciones produce una reducción progresiva de la incertidumbre estadística estimada, confirmando la estabilidad del ensamblaje.

El análisis paramétrico es realizado mediante *study_sigma_sensitivity.m*. En esta etapa se consideran distintos valores de: σ , con el propósito de cuantificar cómo las perturbaciones aleatorias modifican: RMSE, varianza, energía térmica y amplitud máxima. Asimismo, se verifican experimentalmente las leyes de escala $RMSE \propto \sigma$ y $Var(u) \propto \sigma^2$ predichas por la teoría para perturbaciones gaussianas de baja intensidad (Lord & Tambue, 2018).

La función *study_energy_evolution.m* analiza la evolución temporal de la energía térmica como **Ecuación 11:**

$$E(t) = \int_{\Omega} u^2(x, t) dx \quad (11)$$

Comparando el comportamiento determinista y estocástico para diferentes intensidades de ruido (Li & Su, 2022). Esta prueba permite evaluar la capacidad disipativa del sistema y detectar posibles anomalías numéricas.

Para analizar los perfiles medios y perfiles de varianza, se utilizan los scripts *study_mean_profiles.m* y *study_variance_profiles.m* que calculan respectivamente $\bar{u}(x, T)$ y $Var[u(x, T)]$ sobre todo el dominio espacial. Estos perfiles permiten visualizar la distribución espacial de la incertidumbre y comparar como diferentes niveles de ruido modifican la respuesta térmica promedio.

Finalmente, para el análisis de gaussianidad se utiliza el script *study_gaussianity.m* que analiza la distribución estadística de la temperatura en puntos específicos del dominio. Para ello se calculan: asimetría (skewness) y curtosis (kurtosis) (Rice, 2007).

2.6. Reproducibilidad computacional

Con el propósito de garantizar la reproducibilidad de los experimentos numéricos, todas las simulaciones fueron implementadas en MATLAB mediante una arquitectura modular basada en scripts y funciones independientes. La generación de números aleatorios se controló mediante semillas maestras predefinidas, permitiendo replicar exactamente las trayectorias estocásticas y los resultados estadísticos obtenidos.

Los parámetros físicos, numéricos y computacionales empleados en cada experimento fueron almacenados automáticamente junto con los resultados generados, incluyendo las propiedades térmicas del material, la intensidad del ruido, el tamaño de la malla espacio-temporal y el número de realizaciones Monte Carlo.

Asimismo, la estructura modular del código permite la validación independiente de cada componente del modelo, favoreciendo la trazabilidad de los resultados y facilitando la extensión futura del marco computacional hacia otros problemas de difusión bajo incertidumbre.

La simulación es de manejo público, adjunto en el siguiente link de GitHub: <https://github.com/Bri-commits/deterministic-vs-stochastic-heat-equation-1d>

3. Resultados

Los experimentos numéricos se realizaron para la ecuación del calor unidimensional bajo formulaciones deterministas y estocásticas, considerando tres materiales con propiedades difusivas contrastantes: aluminio ($\alpha = 8,44 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$), acero inoxidable ($\alpha = 3,75 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), y madera ($\alpha = 1,45 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$).

Las simulaciones se desarrollaron bajo las condiciones indicadas en la metodología con $\Delta = 0.01$; $\Delta t = 5 \times 10^{-5}$; $T = 0.5$ y $N_{MC} = 200$ realizaciones independientes para el análisis estocástico. El término aleatorio se modeló exclusivamente mediante ruido blanco gaussiano aditivo, con intensidades comprendidas entre $\sigma = 0.01$ y $\sigma = 0.50$.

3.1. Validación del modelo determinista y comportamiento difusivo

La solución determinista obtenida mediante el esquema implícito de Crank–Nicolson presentó un comportamiento estable para los tres materiales analizados, sin evidenciar oscilaciones espurias ni inestabilidades numéricas. Aunque este método es incondicionalmente estable, se mantuvo constante la relación $\Delta t / \Delta x^2 = 0.5$ con el propósito de asegurar una resolución temporal homogénea en todos los experimentos.

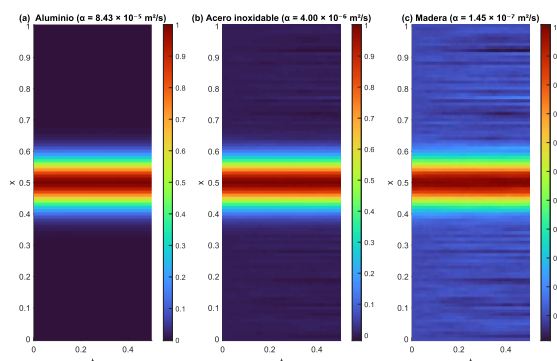
La evolución de la energía térmica mostró una disipación consistente con la difusividad de cada material. El aluminio presentó la mayor reducción relativa de energía, con una razón entre la energía final e inicial de 0,9836, mientras que el acero inoxidable y la madera registraron valores de 0,9993 y 0,9999, respectivamente.

Estos resultados confirman que los materiales de alta difusividad redistribuyen el calor con mayor rapidez, favoreciendo la disipación energética del sistema. En contraste, los materiales de baja difusividad conservan gradientes térmicos más pronunciados durante el intervalo de simulación considerado.

Como se muestra en la **Figura 1**, los mapas espacio-temporales de temperatura preservan la simetría de la condición inicial gaussiana y reproducen el comportamiento físico esperado del proceso difusivo.

Figura 1

Mapas térmicos espacio – temporales de la solución determinista



Nota. Los materiales utilizados fueron aluminio, acero inoxidable y madera. La condición inicial gaussiana evoluciona bajo condiciones de contorno de Dirichlet homogéneas, evidenciando una disipación térmica dependiente de la difusividad del material. El aluminio presenta una rápida redistribución del calor, mientras que la madera conserva gradientes térmicos más pronunciados debido a su menor capacidad difusiva. La evolución temporal es moderada debido al intervalo de simulación considerado ($T=0.5$).

3.2. Influencia de la difusividad térmica en la propagación de la incertidumbre

La incorporación de ruido blanco generó un incremento progresivo de la dispersión estadística, cuya magnitud dependió simultáneamente de la intensidad de la perturbación y de la difusividad térmica del material.

La **Tabla 1** resume las métricas globales obtenidas para $\sigma=0.50$, correspondiente al escenario de máxima perturbación analizado.

Tabla 1

Comparación del RMSE, varianza máxima y energía térmica final para $\sigma=0,50$

Material	RMSE	Varianza máxima	Energía final
Aluminio	$1,80 \times 10^{-2}$	$9,25 \times 10^{-2}$	$8,90 \times 10^{-2}$
Acero inoxidable	$2,53 \times 10^{-2}$	$1,56 \times 10^{-1}$	$9,04 \times 10^{-2}$
Madera	$2,58 \times 10^{-2}$	$1,61 \times 10^{-1}$	$8,95 \times 10^{-2}$

Nota. El RMSE se calculó respecto a la solución determinista de referencia.

Los resultados muestran diferencias significativas entre los materiales estudiados. El aluminio presentó los menores niveles de dispersión estadística, registrando una varianza máxima de $9,25 \times 10^{-2}$ y un RMSE de $1,80 \times 10^{-2}$. Por el contrario, la madera alcanzó

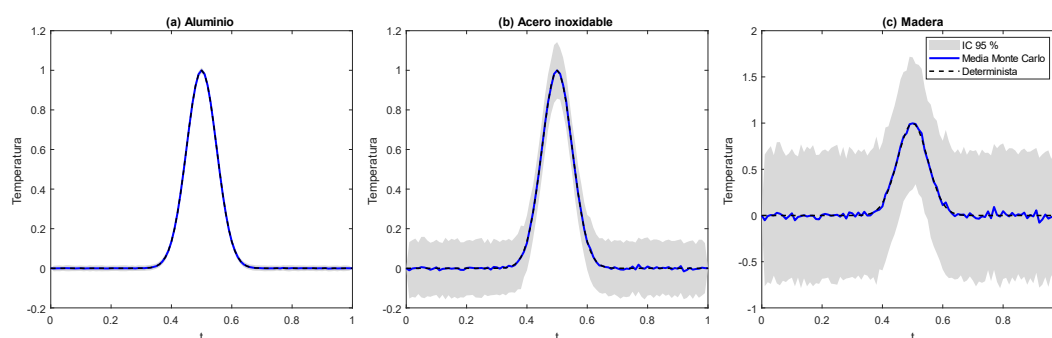
la mayor amplificación de incertidumbre, con una varianza máxima de $1,61 \times 10^{-1}$ y un RMSE de $2,58 \times 10^{-2}$. El acero inoxidable exhibió un comportamiento intermedio, coherente con su difusividad térmica moderada.

A pesar del incremento de la dispersión estadística, la energía térmica final permaneció prácticamente constante para los tres materiales, con variaciones inferiores al 2 % respecto al caso determinista. Este resultado indica que el ruido blanco aditivo modifica principalmente la distribución espacial de la temperatura y la variabilidad de las trayectorias, sin alterar significativamente el balance energético global del sistema.

Como se observa en la **Figura 2**, la incertidumbre asociada a la solución estocástica se manifiesta mediante el ensanchamiento progresivo de los intervalos de confianza alrededor de la media Monte Carlo.

Figura 2

Media del ensamblaje Monte Carlo e intervalos de confianza del 95 % para ruido aditivo



Nota. La línea continua representa la temperatura promedio obtenida a partir de 200 realizaciones independientes de Monte Carlo, mientras que la región sombreada indica el intervalo de confianza del 95 %. La solución determinista de referencia se muestra para comparación. Se observa una ampliación progresiva de las bandas de incertidumbre conforme disminuye la difusividad térmica del material.

La **Figura 2** muestra que el ancho de las bandas de incertidumbre aumenta conforme disminuye la difusividad térmica del material. En el caso del aluminio, las fluctuaciones permanecen relativamente acotadas durante toda la simulación, reflejando una elevada capacidad de disipación de las perturbaciones aleatorias. Por el contrario, la madera presenta bandas considerablemente más amplias, evidenciando una mayor sensibilidad a la acción acumulativa del ruido blanco.

3.3. Análisis de sensibilidad paramétrica respecto a la intensidad del ruido

El incremento de la intensidad de las perturbaciones generó un crecimiento aproximadamente lineal tanto del RMSE como de la varianza máxima para los tres materiales estudiados.

En el caso del aluminio, el RMSE aumentó desde $3,61 \times 10^{-4}$ para $\sigma=0.01$ hasta $1,80 \times 10^{-2}$ para $\sigma=0.50$. De manera similar, el acero inoxidable presentó un incremento

desde $5,06 \times 10^{-4}$ hasta $2,53 \times 10^{-2}$, mientras que la madera registró un aumento desde $5,16 \times 10^{-4}$ hasta $2,58 \times 10^{-2}$.

La varianza máxima mostró una dependencia aproximadamente cuadrática respecto a la intensidad del ruido, consiste con la naturaleza del término estocástico. Para $\sigma=0.01$, los valores de varianza máxima fueron 3.70×10^{-5} , 6.23×10^{-5} y 6.44×10^{-5} para aluminio, acero inoxidable y madera, respectivamente. En el escenario de máxima perturbación ($\sigma=0.50$), estos valores aumentaron hasta $9,25 \times 10^{-2}$, $1,56 \times 10^{-1}$ y $1,61 \times 10^{-1}$.

El análisis de regresión lineal evidenció una relación prácticamente perfecta entre la intensidad del ruido y el RMSE, con coeficientes de correlación cercanos a 1,00 para los tres materiales. Las pendientes de sensibilidad obtenidas fueron $3,61 \times 10^{-2}$ para el aluminio, $5,06 \times 10^{-2}$ para el acero inoxidable y $5,16 \times 10^{-2}$ para la madera, indicando una mayor sensibilidad de los materiales de baja difusividad frente a incrementos en la intensidad de las perturbaciones.

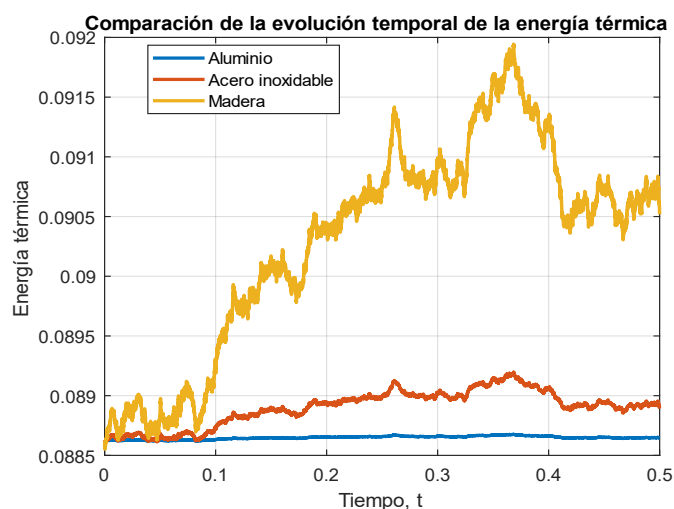
A pesar del aumento de la dispersión estadística, la energía térmica final permaneció prácticamente constante en todos los escenarios, con variaciones inferiores al 3 % respecto al caso determinista. Este resultado demuestra que el ruido blanco gaussiano modifica principalmente la variabilidad de las trayectorias individuales, sin alterar de forma significativa la dinámica energética global del sistema.

3.4. Influencia de la difusividad térmica sobre la energía térmica promedio

Además de las métricas de dispersión estadística, se analizó la evolución temporal de la energía térmica promedio, la cual permite evaluar el efecto global de las perturbaciones aleatorias sobre el contenido energético del sistema.

Figura 3

Comparación temporal de la energía térmica promedio para los materiales analizados bajo ruido blanco aditivo



Nota. La energía térmica se calculó a partir de la media del ensamblaje Monte Carlo para $\sigma=0.50$.

Como se observa en la **Figura 3**, la energía térmica permaneció acotada durante todo el intervalo de simulación para los tres materiales estudiados. No obstante, la magnitud de las fluctuaciones energéticas presentó diferencias apreciables asociadas a la difusividad térmica de cada material.

La madera exhibió las mayores variaciones temporales, alcanzando niveles energéticos superiores a los observados en aluminio y acero inoxidable. Por el contrario, el aluminio mostró una evolución considerablemente más estable, con oscilaciones de baja amplitud alrededor de un valor medio prácticamente constante.

Estos resultados son consistentes con el comportamiento observado en las métricas de varianza y RMSE presentadas en la **Tabla 1**. Los materiales con mayor difusividad térmica redistribuyen con mayor rapidez las perturbaciones introducidas por el término estocástico, reduciendo la acumulación local de energía asociada a las fluctuaciones aleatorias. En contraste, los materiales menos difusivos presentan una mayor persistencia de dichas perturbaciones, lo que se traduce en una respuesta energética más variable.

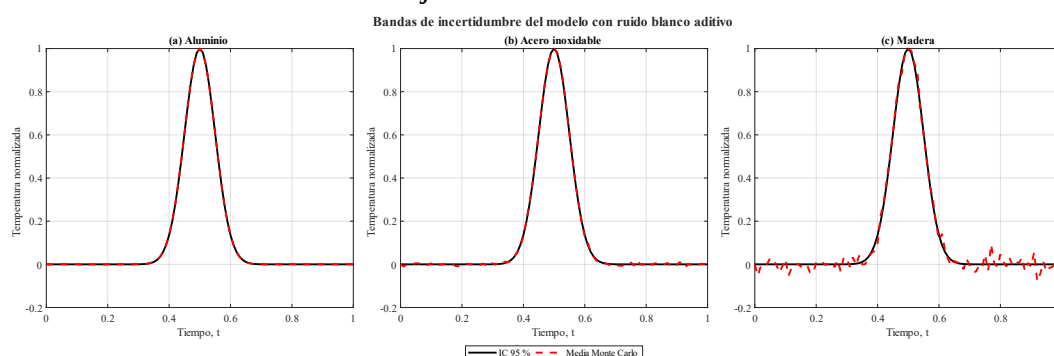
A pesar de estas diferencias, la energía térmica promedio permaneció dentro de un rango relativamente estrecho durante toda la simulación, indicando que el ruido blanco aditivo modifica principalmente la variabilidad estadística de las trayectorias térmicas sin alterar significativamente la estabilidad energética global del sistema.

3.5. Comparación entre la solución determinista y la respuesta estocástica promedio

Con el propósito de evaluar el efecto global de las perturbaciones aleatorias sobre la dinámica térmica, se comparó la solución determinista de referencia con la media estadística obtenida mediante simulación Monte Carlo.

Figura 4

Comparación entre la solución determinista y la media del ensamblaje Monte Carlo bajo ruido blanco aditivo



Nota. La línea continua representa la solución determinista obtenida mediante Crank–Nicolson, mientras que la línea discontinua corresponde a la media del ensamblaje Monte Carlo.

La **Figura 4** muestra una elevada concordancia entre la solución determinista y la media estocástica para los tres materiales analizados. Las diferencias observadas son relativamente pequeñas en comparación con la amplitud total del campo térmico, lo que indica que el ruido blanco aditivo no altera la dinámica promedio del fenómeno difusivo.

No obstante, la magnitud de las desviaciones aumenta ligeramente conforme disminuye la difusividad térmica, siendo más evidente en la madera. Este comportamiento coincide con los valores de RMSE reportados en la **Tabla 1** y confirma que los materiales menos difusivos presentan una mayor susceptibilidad frente a perturbaciones aleatorias.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que la incertidumbre inducida por el ruido blanco afecta principalmente la dispersión estadística de las trayectorias térmicas, mientras que la evolución promedio del sistema permanece cercana a la solución determinista. Esto sugiere que la principal consecuencia de la incertidumbre no radica en modificar la tendencia global del proceso de difusión, sino en incrementar la variabilidad asociada a las predicciones térmicas.

3.6. Validación numérica de las aproximaciones estocásticas

Las simulaciones se complementaron con pruebas de validación orientadas a verificar la consistencia numérica y estadística del modelo implementado. Para ello, se evaluaron la convergencia espacial y temporal del esquema de Crank–Nicolson, la convergencia fuerte y débil del método de Euler–Maruyama, la estabilidad del ensamblaje Monte Carlo y la consistencia probabilística del ruido blanco aditivo exponiendo en la **Tabla 2** el valor teórico, el valor experimental y el error relativo existente.

Tabla 2

Resultados de la validación numérica de los esquemas determinista y estocástico

Análisis	Método numérico	Valor teórico	Valor experimental	Error relativo (%)
Convergencia espacial	Crank–Nicolson	2,0	2,0004	0,02
Convergencia temporal	Crank–Nicolson	2,0	2,2067	10,33
Convergencia fuerte	Euler–Maruyama	0,5	0,4356	12,88
Convergencia débil	Euler–Maruyama	1,0	0,9909	0,91
Convergencia Monte Carlo	Muestreo Monte Carlo	$O\left(N_{MC}^{-\frac{1}{2}}\right)$	Verificada para $N_{MC} = 200$	—
Gaussianidad	Ruido blanco aditivo	Asimetría = 0; Curtosis = 3	Asimetría = 0,0828; Curtosis = 2,7962	—

Nota. El RMSE se calculó respecto a la solución determinista de referencia. Los órdenes teóricos corresponden a los resultados clásicos reportados para los esquemas de Crank–Nicolson y Euler–Maruyama en la literatura especializada. Las propiedades de gaussianidad se evaluaron respecto a los valores teóricos de asimetría nula y curtosis igual a tres.

La estabilización de las métricas estadísticas a partir de $N_{MC} = 200$ realizaciones confirmó la suficiencia del tamaño muestral empleado, mientras que la evolución del RMSE presentó una tendencia convergente acorde con la tasa teórica $O\left(N_{MC}^{-\frac{1}{2}}\right)$.

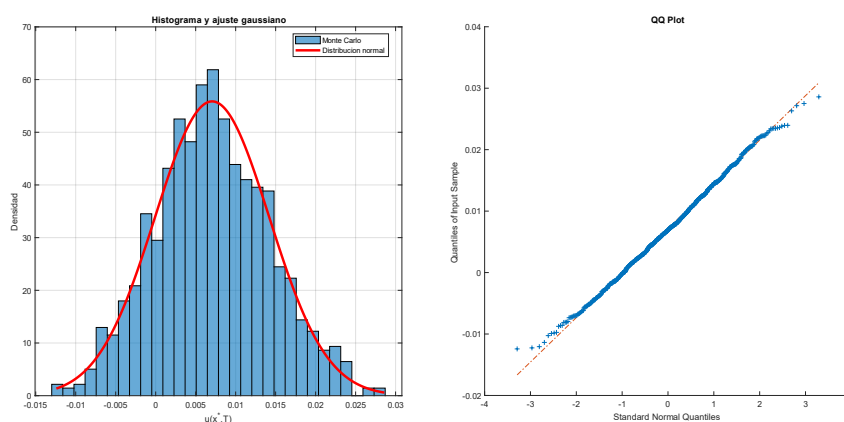
Los análisis de convergencia espacial y temporal expuestos en la **Tabla 2**, evidenciaron órdenes experimentales de 2,0004 y 2,2067, respectivamente, en concordancia con el comportamiento teórico de segundo orden del esquema de Crank–Nicolson. Asimismo, el método de Euler–Maruyama alcanzó órdenes experimentales de 0,4356 para la convergencia fuerte y de 0,9909 para la convergencia débil, próximos a los valores teóricos de $O(\Delta t^{\frac{1}{2}})$ y $O(\Delta t)$.

La ligera discrepancia observada en la convergencia fuerte puede atribuirse al carácter estadístico del método Monte Carlo, al número finito de realizaciones consideradas $N_{MC} = 500$ y al conjunto limitado de discretizaciones temporales evaluadas.

En conjunto, estos resultados demuestran que las soluciones obtenidas son independientes de la discretización empleada dentro de los rangos analizados, descartando la presencia de errores numéricos dominantes y permitiendo atribuir la dispersión observada a la naturaleza física del término estocástico y no a artefactos computacionales.

Figura 5

Validación estadística de las fluctuaciones térmicas generadas por el modelo estocástico



Nota. El histograma muestra una distribución aproximadamente simétrica y consistente con una ley normal. El gráfico cuantil–cuantil (QQ–plot) evidencia una alineación cercana a la recta de referencia para la mayoría de los cuantiles, confirmando que las fluctuaciones generadas mediante los incrementos discretos del proceso de Wiener reproducen adecuadamente el comportamiento gaussiano esperado del ruido blanco utilizado en el modelo.

Con el propósito de verificar la consistencia probabilística del término estocástico, se evaluó la distribución de las fluctuaciones térmicas en el nodo central del dominio ($x=0.5$). Los resultados mostraron una asimetría de 0.0828 y una curtosis de 2.796, valores próximos a los correspondientes a una distribución normal ideal (0 y 3, respectivamente). Como se observa en la **Figura 5**, el histograma experimental presenta un ajuste satisfactorio a la distribución gaussiana teórica, mientras que el gráfico cuantil–cuantil (QQ–plot) evidencia una alineación cercana a la recta de referencia en la mayor

parte del rango de cuantiles. Estas observaciones confirman que las perturbaciones generadas mediante los incrementos discretos del proceso de Wiener reproducen adecuadamente las propiedades estadísticas esperadas del ruido blanco utilizado en la formulación del modelo.

En conjunto, la validación numérica realizada demuestra que la dispersión observada en las simulaciones no constituye un artefacto asociado a la discretización espacial, temporal o al procedimiento de muestreo, sino una consecuencia inherente de la dinámica estocástica introducida en el sistema de conducción térmica. Por tanto, las diferencias identificadas entre materiales y niveles de perturbación son consistentes con la dinámica física representada por el modelo bajo las hipótesis consideradas, respaldando la robustez y confiabilidad de la implementación computacional desarrollada.

Durante el estudio de convergencia espacial, el cálculo de autovalores mediante algoritmos iterativos presentó dificultades de convergencia para la malla más refinada ($N_x = 801$). Sin embargo, esta situación no afectó la solución numérica ni la estimación del orden de convergencia, dado que el operador discreto conservó su estructura simétrica y los errores mantuvieron el comportamiento teórico esperado.

4. Discusión

Los resultados obtenidos permitieron alcanzar el objetivo de la investigación, consistente en comparar las formulaciones determinista y estocástica de la ecuación del calor unidimensional bajo la incorporación de ruido blanco gaussiano aditivo y analizar el efecto de la difusividad térmica sobre la propagación de la incertidumbre.

La elevada concordancia observada entre la solución determinista y la media del ensamblaje Monte Carlo confirma el comportamiento teórico esperado para sistemas gobernados por perturbaciones aditivas de media nula. Este resultado es consistente con la formulación clásica de las ecuaciones diferenciales parciales estocásticas impulsadas por ruido blanco gaussiano, donde la media del proceso conserva la dinámica determinista subyacente, mientras que la incertidumbre se manifiesta a través del incremento de la dispersión estadística de las trayectorias individuales (Kloeden & Platen, 1992; Lord & Tambue, 2018).

Los resultados evidenciaron que la difusividad térmica desempeña un papel determinante en la propagación de la incertidumbre. El aluminio, caracterizado por una elevada difusividad térmica, presentó los menores valores de RMSE, varianza máxima y amplitud de las bandas de incertidumbre, mientras que la madera exhibió la mayor sensibilidad frente a las perturbaciones aleatorias. Este comportamiento confirma que la difusividad térmica no solo regula la velocidad de disipación del calor, sino también la capacidad del material para amortiguar las fluctuaciones inducidas por el ruido, en concordancia con lo señalado por Adamowicz (2022) y Bergman et al. (2019).

La dependencia aproximadamente lineal observada entre la intensidad del ruido y el RMSE, junto con la relación cuadrática identificada para la varianza, coincide con las

leyes de escala teóricas descritas para ecuaciones diferenciales parciales estocásticas con ruido gaussiano aditivo de baja intensidad (Lord & Tambue, 2018). Asimismo, la estabilidad de la energía térmica promedio observado en todos los escenarios analizados indica que las perturbaciones aleatorias afectan principalmente la variabilidad espacial y temporal de la temperatura, sin alterar significativamente el balance energético global del sistema. Este resultado concuerda con los hallazgos reportados por Li & Su (2022) quienes evidenciaron que la incertidumbre térmica modifica la distribución local de la energía sin generar cambios sustanciales en la dinámica energética promedio.

Desde el punto de vista numérico, la validación realizada respalda la confiabilidad de los resultados obtenidos. La comparación con la solución analítica de referencia confirmó la precisión del esquema de Crank-Nicolson para resolver la ecuación del calor determinista, reproduciendo el orden de convergencia esperado de segundo orden en espacio y tiempo (Crank & Nicolson, 1947; LeVeque, 2007). De manera complementaria, las pruebas de convergencia fuerte y débil verificaron el comportamiento teórico del método de Euler-Maruyama para la integración temporal del término estocástico, en concordancia con los resultados reportados por Higham (2001).

Asimismo, la estabilización de las métricas estadísticas a partir de 200 realizaciones Monte Carlo resultó consistente con la tasa de convergencia teórica del error muestral, proporcional a $\left(ON_{MC}^{-\frac{1}{2}}\right)$, descrita por Kroese et al. (2011). La implementación del algoritmo incremental de Welford (1962) permitió además, estimar de manera eficiente la media y la varianza del ensamblaje, reduciendo el costo computacional y minimizando los errores numéricos asociados al almacenamiento masivo de datos.

El análisis de gaussianidad mostró valores de asimetría y curtosis próximos a los correspondientes a una distribución normal ideal, confirmando que las fluctuaciones térmicas generadas reproducen adecuadamente las propiedades estadísticas del proceso de Wiener utilizado en la formulación del modelo (Rice, 2007). Estos resultados respaldan la consistencia probabilística del esquema implementado y permiten atribuir la dispersión observada a la dinámica física del sistema y no a artefactos numéricos.

Si bien la ecuación del calor unidimensional con ruido blanco gaussiano aditivo constituye un problema ampliamente estudiado, continúa siendo un modelo de referencia para el análisis y validación de estrategias numéricas aplicadas a ecuaciones diferenciales parciales estocásticas (Anton et al., 2017; Dong et al., 2025). En este contexto, el principal aporte del presente trabajo radica en la cuantificación comparativa del efecto de la difusividad térmica sobre la propagación de la incertidumbre en materiales con propiedades difusivas contrastantes, aspecto que ha recibido menor atención en la literatura reciente, predominantemente orientada al desarrollo de esquemas numéricos avanzados y al estudio de problemas de mayor complejidad matemática (Khattab et al., 2024; Cîmpean et al., 2026).

Los resultados deben interpretarse considerando el alcance específico de la investigación. El estudio se restringió a una formulación unidimensional, con propiedades térmicas constantes, materiales homogéneos e isotrópicos y condiciones de frontera de Dirichlet homogéneas. Asimismo, el análisis se limitó deliberadamente al caso de ruido blanco gaussiano aditivo, debido a que esta formulación constituye un marco de referencia fundamental para el estudio de la interacción entre difusión e incertidumbre y permite establecer comparaciones directas con la solución determinista.

En consecuencia, la extensión del modelo hacia dominios multidimensionales, ecuaciones no lineales, materiales heterogéneos o formulaciones con otros tipos de perturbaciones representa una línea de investigación futura que excede el alcance del presente estudio. No obstante, el marco computacional desarrollado proporciona una base sólida y reproducible para abordar estos escenarios en investigaciones posteriores.

5. Conclusiones

- La comparación entre las formulaciones determinista y estocástica de la ecuación del calor unidimensional permitió demostrar que la incorporación de ruido blanco gaussiano aditivo incrementa la incertidumbre asociada a la respuesta térmica sin modificar de manera significativa la dinámica promedio del proceso difusivo.
- La difusividad térmica se identificó como un factor determinante en la propagación de la incertidumbre, evidenciando que los materiales con mayor capacidad difusiva presentan un efecto amortiguador frente a las perturbaciones aleatorias, el resultado contribuye a la comprensión del papel que desempeñan las propiedades físicas del material no solo en la transferencia de calor, sino también en la respuesta estadística del sistema bajo perturbaciones aleatorias.
- La estabilidad observada en la energía térmica promedio indica que las perturbaciones aleatorias afectan principalmente la variabilidad espacial y temporal de la temperatura, mientras que el comportamiento energético global permaneció acotado para la ecuación de calor unidimensional bajo perturbaciones de ruido blanco gaussiano aditivo y dentro del rango de parámetros evaluado.
- La validación del esquema numérico implementado, mediante análisis de convergencia espacial y temporal de segundo orden, convergencia fuerte y débil del método de Euler–Maruyama, estabilización estadística del método Monte Carlo y verificación de las propiedades probabilísticas del ruido, permitió garantizar la confiabilidad de las simulaciones y atribuir la dispersión observada a la dinámica estocástica del modelo y no a errores de discretización.
- El principal aporte de esta investigación consiste en proporcionar un marco computacional reproducible para la comparación entre modelos deterministas y estocásticos de conducción de calor, incorporando procedimientos de validación numérica que permiten cuantificar el efecto de la difusividad térmica sobre la

propagación de la incertidumbre en materiales con propiedades difusivas contrastantes.

- Los resultados obtenidos constituyen una base para futuras investigaciones orientadas al estudio de modelos de conducción de calor en dimensiones superiores, geometrías complejas o perturbaciones estocásticas más generales.

6. Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con el artículo presentado.

7. Derechos de autor (copyright)

Los autores son los titulares de los derechos de autor (patrimoniales y/o de explotación) de los contenidos de la revista (*copyright*).

8. Declaración de contribución de los autores

Los autores declaran haber participado de manera equitativa y sustancial en la realización de esta investigación, bajo las responsabilidades según la [Taxonomía CRediT](#) para describir las contribuciones individuales de cada autor al trabajo.

Brigith Magdalena Jiménez Tillaguango & Lidia del Rocio Castro Cepeda realizaron la conceptualización de la investigación, organización y ejecución del ensayo, recopilación y curación de los datos, revisión del análisis estadístico, interpretación de los resultados, elaboración del borrador original, preparación de tablas y figuras, revisión crítica del contenido y aprobación de la versión final del manuscrito.

Divulgación de la delegación a la IA generativa

Los autores declaran el uso de la IA generativa en el proceso de investigación y redacción. Según la taxonomía GAIDeT (2025), las siguientes tareas fueron delegadas a las herramientas GAI bajo supervisión humana total:

- Corrección y edición
- Adaptación y ajuste del tono emocional
- Reformateo

La herramienta GAI utilizada fue: ChatGPT.

La responsabilidad del manuscrito final recae íntegramente en los autores.

Las herramientas GAI no figuran como autores y no asumen responsabilidad por los resultados finales.

Declaración presentada por: Brigith Magdalena Jiménez Tillaguango

9. Costos de financiamiento

La presente investigación fue financiada en su totalidad con fondos propios de los autores.

10. Referencias bibliográficas

- Adamowicz, A. (2022). Determination of thermal diffusivity values based on the inverse problem of heat conduction – numerical analysis. *Acta Mechanica et Automatica*, 16(4), 399-407. <https://doi.org/10.2478/ama-2022-0048>
- Anton, R., Cohen, D., & Quer-Sardanyons, L. (2017). A fully discrete approximation of the one-dimensional stochastic heat equation. *arXiv [math.NA]*. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.08340>
- Azorin Penalva, A., & Yaulema Castañeda, J. L. (2021). Case analysis numerical solution of differential equations with uncertainty and applications. *Conciencia Digital*, 4(3.1), 253-272. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v4i3.1.1828>
- Bayer, C., Ben Hammouda, C., & Tempone, R. (2024). Multilevel Monte Carlo with numerical smoothing for robust and efficient computation of probabilities and densities. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 46(3), A1514–A1548. <https://doi.org/10.1137/22M1495718>
- Benítez Guarnizo, G. M., Toledo Toledo, J. F., & Martínez Ochoa, L. L. (2025). Implementación de un prototipo de calentador solar para evaluar las variaciones de temperatura producidas en el interior de un cuarto de estudio en la ciudad de Loja. *Alfa Publicaciones*, 7(2.1), 122–149. <https://doi.org/10.33262/ap.v7i2.1.613>
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2019). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, Inc. https://books.google.com.ec/books/about/Fundamentals_of_Heat_and_Mass_Transfer.html?id=0kAxEAAQBAJ&redir_esc=y
- Bogoi, A., Dan, C.-I., Strătilă, S., Cican, G., & Crunteanu, D.-E. (2023). Assessment of stochastic numerical schemes for stochastic differential equations with “white noise” using Itô’s integral. *Symmetry*, 15(11), 2038. <https://doi.org/10.3390/sym15112038>
- Cîmpean, I., Nachit, Y., & Tudor, C. A. (2026). Quartic variation of the solution to the semilinear stochastic heat equation: Limit behavior and asymptotic independence with respect to the data. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 557(1), 130258. <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2025.130258>
- Crank, J., & Nicolson, P. (1947). A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 43(1), 50–67. <https://doi.org/10.1017/S0305004100023197>
- Dong, J., Zhao, W., & Li, H. (2025). A structure-preserving reduced-order finite difference approach for a class of semilinear stochastic partial differential equations driven by white noise. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 552(2), 129807. <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2025.129807>
- Elizalde Pin, R. A., Macao Ortega, J. A., & Marrero Ramírez, S. (2024). Análisis comparativo de consumo de energía en una estación de bombeo de agua con

- diferentes algoritmos de control voltaje/frecuencia. *Alfa Publicaciones*, 6(2.2), 48–67. <https://doi.org/10.33262/ap.v6i2.2.488>
- Ermakov, S. & Smilovitsky, M. G. (2021). Monte-Carlo for solving large linear systems of ordinary differential equations. *Vestnik of Saint Petersburg University Mathematics Mechanics Astronomy*, 8 (1), 37–48. <https://doi.org/10.21638/spbu01.2021.104>
- Esmaeilbeigi, M., Chatrabgoun, O., & Shafa, M. (2019). Numerical solution of time-dependent stochastic partial differential equations using RBF partition of unity collocation method based on finite difference. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 104, 120–134. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.03.013>
- Evans, L. (2022). *Partial differential equations* (Vol. 19). American Mathematical Society. https://books.google.com.ec/books/about/Partial_Differential_Equations.html?id=Ott1EAAQBAJ&redir_esc=y
- Ghajar, A. J., & Çengel, Y. A. (2025). *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*. McGraw Hill LLC. https://books.google.com.ec/books/about/Heat_and_Mass_Transfer_Fundamentals_and.html?id=B89MnwEACAAJ&redir_esc=y
- Guzmán Clavijo, C. R., & Alvear Calle, D. A. (2021). Application of the thermal balance equation to determine hygrothermal comfort in a single-family house in canton Giron. *Ciencia Digital*, 5(2), 149-164. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v5i2.1722>
- Higham, D. J. (2001). An algorithmic introduction to numerical simulation of stochastic differential equations. *SIAM Review*, 43(3), 525–546. <https://doi.org/10.1137/S0036144500378302>
- Khattab, A. G., Semary, M. S., Hammad, D. A., & Fareed, A. F. (2024). Exploring stochastic heat equations: a numerical analysis with fast discrete fourier transform techniques. *Axioms*, 13(12), 886. <https://doi.org/10.3390/axioms13120886>
- Kloeden, P. E., & Platen, E. (1992). *Numerical solution of stochastic differential equations*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-12616-5>
- Kroese, D. P., Taimre, T., & Botev, Z. I. (2011). *Handbook of Monte Carlo methods*. Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Handbook+of+Monte+Carlo+Methods-p-9781118014943>
- LeVeque, R. J. (2007). *Finite difference methods for ordinary and partial differential equations: steady-state and time-dependent problems*. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM). https://books.google.com.ec/books/about/Finite_Difference_Methods_for_Ordinary_a.html?id=lZysESfSWwgC
- Li, Y., & Su, C. (2022). Stochastic heat transfer analysis and reliability assessment under non-stationary random thermal load using the explicit time-domain method.

- International Journal of Heat and Mass Transfer*, 194, 123011.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123011>
- Lord, G. J., & Tambue, A. (2018). A modified semi-implicit Euler-Maruyama scheme for finite element discretization of SPDEs with additive noise. *Applied Mathematics and Computation*, 332, 105–122. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2018.03.014>
- Navas Muñoz, M. J., Matovelle Bustos, C., Vélez Arcentales, A., & Córdova, F. (2022). Evaluación de modelos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales para la generación de mapas de inundaciones en un río de montaña. *Alfa Publicaciones*, 4(1), 163–182. <https://doi.org/10.33262/ap.v4i1.181>
- Ogethakpo, A. & Nkonyeasua, I. (2025). Analyzing Computational Approaches for Differential Equations: A Study of MATLAB, Mathematica, and Maple. *arXiv [cs.MS]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.02346>
- Rice, J. A. (2007). *Mathematical statistics and data analysis* (3rd ed.). Cengage Learning.
<https://korivernon.com/documents/MathematicalStatisticsandDataAnalysis3ed.pdf>
- Seyer, L., Enguehard, F., & Rochais, D. (2024). Deterministic and stochastic approaches for the modeling of conduction-radiation coupling within non-Beerian semi-transparent media. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 325 (109086), 109086. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2024.109086>
- Sterr, B., Mahravan, E., & Kim, D. (2021). Uncertainty quantification of heat transfer in a microchannel heat sink with random surface roughness. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 174(121307), 121307.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121307>
- Villasante, A., Fernández-Serrano, Á., Osuna-Sequera, C., & Hermoso, E. (2025). Methodology for stiffness prediction in structural timber using cross-validation RMSE analysis. *Journal of Building Engineering*, 107(112767), 112767.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112767>
- Welford, B. P. (1962). Note on a method for calculating corrected sums of squares and products semantic scholar. *Technometrics*, 4(3), 419-420.
<https://doi.org/10.1080/00401706.1962.10490022>
- Zhang, A., & Li, Y. (2023). Thermal conductivity of aluminum alloys—a review. *Materials*, 16(8), 2972. <https://doi.org/10.3390/ma16082972>

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Alfa Publicaciones**.



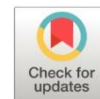
El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Alfa Publicaciones**.



Evaluación de la tolerancia a la salinidad en soya (*Glycine max* L.) mediante el rendimiento germinativo

*Assessment of salinity tolerance in soybean (Glycine max L.) through
germination performance*

- ¹ Diana Karina Ramírez Andrade  <https://orcid.org/0000-0003-0407-6953>
Universidad Técnica de Machala (UTMACH), Machala, Ecuador.
Maestría en Agronomía, mención Producción Vegetal
dramirez31@utmachala.edu.ec
- ² Gabriela Eugenia Ajila Celi  <https://orcid.org/0000-0001-8019-2599>
Universidad Técnica de Machala (UTMACH), Machala, Ecuador.
Maestría en Agronomía, mención Producción Vegetal
geajila@utmachala.edu.ec



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 13/05/2026

Revisado: 14/06/2026

Aceptado: 21/07/2026

Publicado: 11/08/2026

DOI: <https://doi.org/10.33262/ap.v8i3.705>

Cítese:

Ramírez Andrade, D. K., & Ajila Celi, G. E. (2026). Evaluación de la tolerancia a la salinidad en soya (*Glycine max* L.) mediante el rendimiento germinativo. AlfaPublicaciones, 8(3), 70–84. <https://doi.org/10.33262/ap.v8i3.705>



ALFA PUBLICACIONES, es una revista multidisciplinar, **trimestral**, que se publicará en soporte electrónico tiene como **misión** contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://alfapublicaciones.com>

La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec

Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons Attribution Non Commercial No Derivatives 4.0 International. Copia de la licencia: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Palabras claves:

Salinidad;
germinación;
Glycine max;
NaCl;
plántulas normales;
vigor;
biomasa.

Resumen

Introducción. La salinidad puede conservar el inicio de la germinación y, al mismo tiempo, comprometer la formación de plántulas funcionales, el crecimiento y la acumulación de biomasa en soya. **Objetivo.** Evaluar la respuesta de semillas de soya a 0, 50 y 100 mM de NaCl mediante indicadores de germinación temprana, normalidad de plántulas, crecimiento y biomasa. **Metodología.** Se aplicó un diseño completamente al azar con tres tratamientos y seis unidades experimentales por tratamiento, cada una con 50 semillas de un lote comercial de identidad varietal no declarada. El ensayo se mantuvo durante ocho días a 25 ± 2 °C y 12 h de luz. Se determinaron la germinación al quinto día, las plántulas normales al octavo día, las longitudes de brote y raíz, la pérdida de agua y la masa seca. Los datos se analizaron mediante ANOVA de una vía y Tukey al 5 %. **Resultados.** La germinación al quinto día permaneció entre 88,83 y 94,00 % sin diferencias estadísticas. En contraste, las plántulas normales disminuyeron de 83,33 % en el control a 57,83 y 45,83 % con 50 y 100 mM. A 100 mM, el brote y la raíz alcanzaron 1,85 y 3,20 cm, la pérdida de agua aumentó a 79,34 % y la masa seca radicular y aérea descendió a 0,06 y 0,87 g. **Conclusión.** El lote evaluado mantuvo una elevada capacidad de iniciar la germinación, pero su establecimiento temprano fue sensible al NaCl, especialmente a 100 mM. La normalidad de plántulas, el crecimiento y la biomasa discriminaron mejor el estrés que el primer conteo de germinación. **Área de estudio general:** Ciencias agrícolas. **Área de estudio específica:** Fisiología vegetal y tecnología de semillas. **Tipo de estudio:** Artículo original.

Keywords:

Salinity;
germination;
Glycine max;
NaCl;
normal seedlings;
vigor;
biomass.

Abstract

Introduction. Salinity may leave the onset of germination unchanged while impairing the formation of functional seedlings, early growth, and biomass accumulation in soybeans. **Objective.** To evaluate the response of soybean seeds to 0, 50, and 100 mM NaCl using early germination, seedling normality, growth, and biomass indicators. **Methodology.** A completely randomized design was used with three treatments and six experimental units per treatment, each containing 50 seeds from a commercial lot whose varietal identity was not declared. The

test was maintained for eight days at 25 ± 2 °C under a 12 h photoperiod. Germination on day 5, normal seedlings on day 8, shoot and root lengths, water loss, and dry mass were measured. Data were analyzed by one-way ANOVA and Tukey's test at 5%. **Results.** Day-5 germination remained between 88.83% and 94.00%, with no statistical differences. In contrast, normal seedlings decreased from 83.33% in the control to 57.83% and 45.83% at 50 and 100 mM. At 100 mM, shoot and root lengths reached 1.85 and 3.20 cm, water loss increased to 79.34%, and root and shoot dry mass decreased to 0.06 and 0.87 g. **Conclusion.** The evaluated seed lot retained a high capacity to initiate germination, whereas early seedling establishment was sensitive to NaCl, especially at 100 mM. Seedling normality, growth, and biomass discriminated against stress more effectively than the first germination count. **General area of study:** Agricultural sciences. **Specific area of study:** Plant physiology and seed technology. **Type of study:** Original article.

1. Introducción

La salinidad del suelo limita el establecimiento y la productividad de numerosos cultivos porque reduce el potencial hídrico del medio e impone, de manera progresiva, desequilibrios iónicos y oxidativos. La respuesta vegetal combina una fase osmótica temprana, asociada con menor absorción de agua y restricción de la expansión celular, y una fase iónica posterior, vinculada con la acumulación de sodio y cloruro, la alteración de la nutrición mineral y el daño metabólico. La intensidad de esos efectos depende de la especie, el genotipo, el órgano y el momento del desarrollo (Alzahrani, 2024; Van Zelm et al., 2020; Oñate et al., 2019).

La soya (*Glycine max* L.) posee elevada importancia alimentaria e industrial, pero presenta una respuesta heterogénea frente a la salinidad. La tolerancia no constituye un rasgo único: puede expresarse de forma distinta durante la imbibición, la germinación, el establecimiento de la plántula y las fases vegetativas o reproductivas. En esta especie se describió mecanismos de exclusión y compartimentación de sodio, mantenimiento de la relación K^+/Na^+ y regulación de genes asociados con defensa y homeostasis; no obstante, la magnitud de la respuesta varía ampliamente entre materiales (Guan et al., 2024; Liu et al., 2023; Gaibor et al., 2024; Arciniega et al., 2018).

Los ensayos de semillas en condiciones controladas constituyen una alternativa rápida para detectar diferencias tempranas. En ellos es necesario distinguir el primer conteo de germinación de la proporción de plántulas normales: una semilla puede emitir la radícula y, aun así, originar una plántula con estructuras insuficientes para continuar su desarrollo. Por esta razón, las reglas de evaluación de semillas y los estudios de cribado recomiendan integrar germinación, normalidad de plántulas, crecimiento y vigor, en lugar de interpretar un único porcentaje de forma aislada (International Seed Testing Association [ISTA], 2026; Zhou et al., 2023; Han et al., 2025; Gobade et al., 2025).

La evidencia reciente confirma que concentraciones de NaCl entre 50 y 150 mM pueden modificar la germinación, la elongación de brotes y raíces, la biomasa y diferentes respuestas fisiológicas, aunque el umbral de afectación depende del genotipo y del criterio utilizado. Asimismo, los programas de selección incorporaron métodos fenotípicos y genómicos para identificar materiales con respuestas más estables frente al estrés salino (Begum et al., 2022; Kokebie et al., 2024; Chen et al., 2024; Wang et al., 2024; Xu et al., 2024).

En Ecuador existe información limitada sobre la respuesta temprana de lotes comerciales de soya sometidos a gradientes definidos de NaCl, especialmente cuando se comparan indicadores de inicio de germinación con variables de calidad de plántula. En este contexto, el objetivo fue evaluar la tolerancia a la salinidad en semillas de soya mediante indicadores de germinación, crecimiento inicial y biomasa bajo 0, 50 y 100 mM de NaCl. Se planteó como hipótesis que el incremento de la concentración salina reduciría la proporción de plántulas normales, la longitud de brote y raíz y la acumulación de materia seca, aun cuando la germinación al quinto día permaneciera relativamente alta.

2. Metodología

Se desarrolló un estudio cuantitativo, experimental y de alcance comparativo, bajo un diseño completamente al azar con un factor: concentración de cloruro de sodio. Se evaluaron tres niveles, 0 mM (control), 50 mM y 100 mM de NaCl. Cada tratamiento estuvo conformado por seis unidades experimentales de 50 semillas, para un total de 900 semillas evaluadas. Esta estructura permitió contrastar el efecto del gradiente salino sobre variables de germinación, calidad de plántula, crecimiento y biomasa.

2.1. Material biológico y condiciones del ensayo

El ensayo se ejecutó en abril de 2026 bajo condiciones controladas de laboratorio en Machala, Ecuador. Se utilizó un lote comercial de semillas de soya cuya identidad varietal no fue declarada por el proveedor; esta condición se consideró posteriormente como una limitación para generalizar los resultados a un genotipo específico. Las semillas se seleccionaron visualmente antes de la instalación del ensayo.

Cada unidad experimental se dispuso sobre papel Germitest® humedecido con un volumen de solución equivalente a tres veces la masa seca del papel. Los rollos se aseguraron con bandas elásticas, se colocaron en fundas herméticas de polipropileno y se

mantuvieron durante ocho días a 25 ± 2 °C, con un fotoperiodo de 12 h de luz y 12 h de oscuridad.

2.2. Preparación de los tratamientos salinos

El tratamiento control se preparó con agua destilada. Para los tratamientos salinos se disolvió NaCl de grado analítico hasta obtener concentraciones nominales de 50 y 100 mM. En 500 mL de solución, estas concentraciones correspondieron aproximadamente a 1,46 y 2,92 g de NaCl, respectivamente. Cada unidad recibió únicamente la solución asignada a su tratamiento, con el fin de mantener la independencia del gradiente experimental.

2.3. Variables y procedimientos de medición

La germinación al quinto día (G5) se calculó como el número de semillas que iniciaron la germinación respecto de las 50 semillas evaluadas en cada unidad. El porcentaje de plántulas normales al octavo día (PN8) se determinó con relación al total de semillas de la unidad experimental y consideró la presencia de estructuras esenciales suficientemente desarrolladas y sin deterioro visible, de acuerdo con los criterios generales de evaluación de plántulas (**Ecuación 1**).

$$G5 (\%) = (\text{semillas germinadas al día 5} / 50) \times 100 \quad (1)$$

$$PN8 (\%) = (\text{plántulas normales al día 8} / 50) \times 100$$

La longitud del brote y la longitud de la raíz se registraron en centímetros en diez plántulas normales seleccionadas por unidad experimental. Para la evaluación de biomasa se pesaron por separado las fracciones radicular y aérea en estado fresco y, posteriormente, se secaron a 65 °C durante 24 h o hasta masa constante. La masa seca radicular y la masa seca de la parte aérea se expresaron en gramos. La pérdida de agua se estimó como la proporción de masa eliminada durante el secado respecto de la masa fresca total (2) tanto, se interpretó como un indicador gravimétrico de contenido de agua y no como una medición directa de transpiración o estado hídrico tisular (**Ecuación 2**).

$$\text{Pérdida de agua (\%)} = [(masa fresca total - masa seca total) / masa fresca total] \times 100$$

2.4. Criterios de selección, eliminación y aspectos éticos

Se incluyeron semillas completas, de tamaño visualmente uniforme y sin daño mecánico, decoloración severa o signos evidentes de contaminación. Se excluyeron semillas quebradas, deformadas o con deterioro visible. Se estableció como criterio de eliminación de una unidad experimental la contaminación generalizada, la pérdida del nivel de humedad por falla del empaque o una desviación evidente de las condiciones de incubación; no se registraron unidades eliminadas y el análisis se realizó con $n = 6$ por tratamiento. Debido a que el estudio empleó material vegetal y no involucró seres humanos ni animales, no requirió consentimiento informado ni aprobación de un comité de ética. Se conservaron la trazabilidad de los datos, los registros de laboratorio y la separación entre observaciones originales y cálculos derivados.

2.5. Análisis estadístico

Para cada variable se calcularon la media y el error patrón de la media (EPM). El efecto de la concentración de NaCl se evaluó mediante un análisis de varianza de una vía y, cuando correspondió, las medias se compararon con la prueba de Tukey al 5 % de probabilidad. El procesamiento se realizó en Python 3.11 con las bibliotecas SciPy y statsmodels, y las figuras se generaron con Matplotlib. Además, se calculó el cambio relativo de cada tratamiento salino respecto del control para facilitar la comparación de la magnitud de respuesta entre variables.

3. Resultados

Los resultados se organizaron de acuerdo con las variables evaluadas y el efecto de las concentraciones de 0, 50 y 100 mM de NaCl. Primero, se compararon la germinación al quinto día y el porcentaje de plántulas normales al octavo día; posteriormente, se analizaron el crecimiento inicial, la pérdida de agua y la acumulación de biomasa seca. Finalmente, se integraron los cambios relativos de los tratamientos salinos respecto del control para identificar los indicadores más sensibles al estrés.

3.1. Germinación al quinto día y plántulas normales

Como se muestra en la **Tabla 1**, la germinación al quinto día se mantuvo elevada en los tres tratamientos y las medias compartieron la misma letra de Tukey. El control alcanzó 94,00 %, mientras que 50 y 100 mM de NaCl registraron 92,17 y 88,83 %, respectivamente. En consecuencia, el gradiente salino no modificó de manera estadísticamente detectable el inicio del proceso germinativo.

Tabla 1

Germinación al quinto día y plántulas normales de soya bajo tres niveles de NaCl

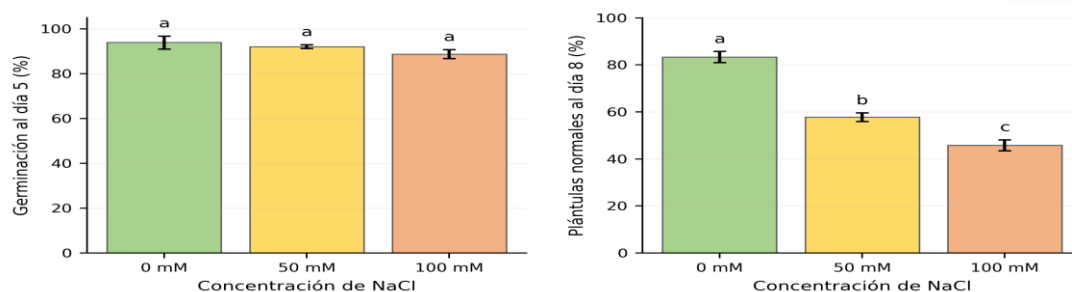
Tratamiento	Germinación al día 5 (%)	Plántulas normales al día 8 (%)
0 mM NaCl	94,00 ± 2,90 a	83,33 ± 2,38 a
50 mM NaCl	92,17 ± 0,79 a	57,83 ± 1,82 b
100 mM NaCl	88,83 ± 1,99 a	45,83 ± 2,36 c

Nota. Valores expresados como media ± EPM (n = 6). Letras distintas dentro de una misma columna indican diferencias estadísticas según Tukey al 5 %.

La respuesta cambió al considerar la calidad de las plántulas al octavo día. El porcentaje de plántulas normales disminuyó desde 83,33 % en el control hasta 57,83 % con 50 mM y 45,83 % con 100 mM, y los tres tratamientos se separaron estadísticamente. La **Figura 1** evidencia que el primer conteo de germinación fue poco sensible, mientras que la normalidad de plántulas mostró un deterioro progresivo con la concentración salina.

Figura 1

Germinación al quinto día y plántulas normales al octavo día bajo tres niveles de NaCl



Nota. Las barras representan la media $\pm$ EPM ($n = 6$). Letras iguales indican ausencia de diferencias y letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos según Tukey al 5 %.

Respecto del control, la germinación al quinto día disminuyó solo 1,9 % con 50 mM y 5,5 % con 100 mM. En cambio, las plántulas normales se redujeron 30,6 y 45,0 %, respectivamente, lo que confirma una mayor sensibilidad de la formación de plántulas funcionales frente al estrés.

3.2. Crecimiento inicial

En la **Tabla 2** se observa que el tratamiento de 50 mM mantuvo longitudes de brote y raíz estadísticamente similares al control. La respuesta fue diferente con 100 mM: la longitud del brote descendió a 1,85 cm y la raíz a 3,20 cm, con letras distintas respecto de los tratamientos de menor salinidad.

Tabla 2

Longitud del brote y de la raíz de plántulas de soya bajo salinidad

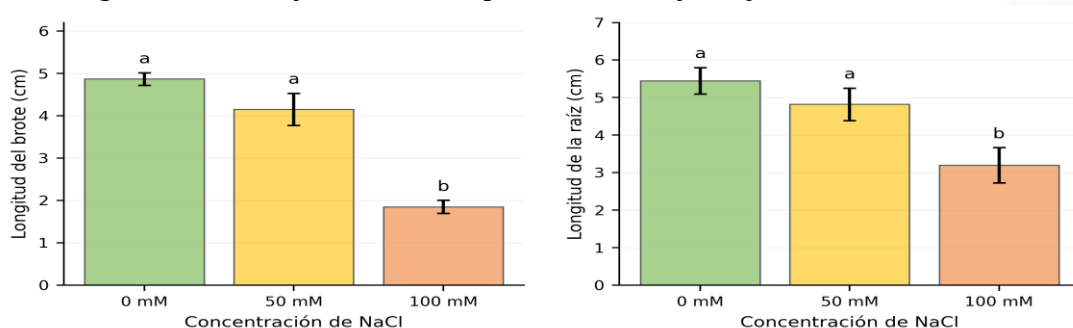
Tratamiento	Longitud del brote (cm)	Longitud de la raíz (cm)
0 mM NaCl	4,87 $\pm$ 0,148 a	5,45 $\pm$ 0,349 a
50 mM NaCl	4,15 $\pm$ 0,378 a	4,82 $\pm$ 0,435 a
100 mM NaCl	1,85 $\pm$ 0,157 b	3,20 $\pm$ 0,469 b

Nota. Valores expresados como media $\pm$ EPM ($n = 6$). Letras distintas dentro de una misma columna indican diferencias estadísticas según Tukey al 5 %.

La **Figura 2** permite apreciar que el efecto de 100 mM fue proporcionalmente más marcado sobre el brote. Frente al control, esta concentración redujo la longitud aérea 62,0 % y la longitud radicular 41,3 %. A 50 mM, las reducciones fueron 14,8 y 11,6 %, respectivamente, sin separación estadística de las medias.

Figura 2

Longitud del brote y de la raíz de plántulas de soya bajo tres niveles de NaCl



Nota. Las barras representan la media $\pm$ EPM ($n = 6$). Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas entre tratamientos según Tukey al 5 %.

El patrón indica que el material evaluado toleró una concentración intermedia durante la elongación inicial, pero no mantuvo el crecimiento cuando el medio alcanzó 100 mM de NaCl. La mayor reducción relativa del brote sugiere una limitación importante en la expansión de la parte aérea durante el establecimiento.

3.3. Pérdida de agua y biomasa seca

Como se resume en la **Tabla 3**, la pérdida de agua fue similar entre el control y 50 mM, con valores de 71,76 y 73,26 %. El tratamiento de 100 mM aumentó este indicador a 79,34 % y se separó estadísticamente de los dos niveles inferiores. La masa seca radicular disminuyó de 0,14 g en el control a 0,06 g con 100 mM; la masa seca aérea descendió de forma progresiva desde 1,46 hasta 0,87 g.

Tabla 3

Pérdida de agua y masa seca de plántulas de soya bajo salinidad

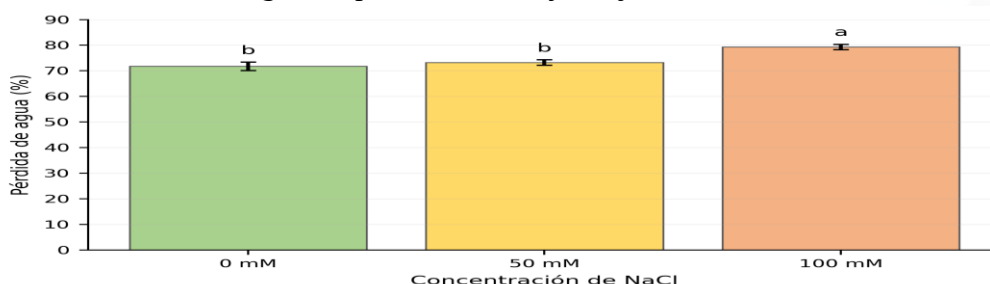
Tratamiento	Pérdida de agua (%)	Masa seca radicular (g)	Masa seca aérea (g)
0 mM NaCl	71,76 $\pm$ 1,640 b	0,14 $\pm$ 0,0021 a	1,46 $\pm$ 0,0326 a
50 mM NaCl	73,26 $\pm$ 1,100 b	0,12 $\pm$ 0,0033 a	1,24 $\pm$ 0,0035 b
100 mM NaCl	79,34 $\pm$ 1,040 a	0,06 $\pm$ 0,0121 b	0,87 $\pm$ 0,0422 c

Nota. Valores expresados como media $\pm$ EPM ($n = 6$). Letras distintas dentro de una misma columna indican diferencias estadísticas según Tukey al 5 %.

La **Figura 3** muestra el incremento del componente acuoso relativo de las plántulas sometidas a 100 mM. Debido a que esta variable se calculó a partir de la diferencia entre masa fresca y seca, el resultado representa una menor proporción de materia seca respecto de la masa fresca, y no debe interpretarse de manera aislada como una medición directa de deshidratación.

Figura 3

Pérdida de agua de plántulas de soya bajo tres niveles de NaCl

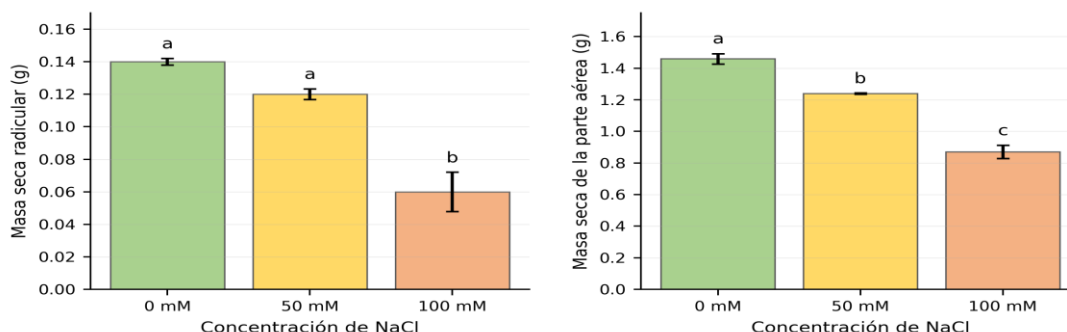


Nota. Las barras representan la media $\pm$ EPM ($n = 6$). Letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos según Tukey al 5 %.

La biomasa seca confirmó la pérdida de capacidad de acumulación bajo salinidad. Con 50 mM, la masa radicular se redujo 14,3 % y la aérea 15,1 % respecto del control. Con 100 mM, las reducciones alcanzaron 57,1 y 40,4 %, respectivamente. Como se observa en la **Figura 4**, la raíz mostró la mayor disminución relativa, mientras que la parte aérea presentó una respuesta gradual entre los tres tratamientos.

Figura 4

Masa seca radicular y aérea de plántulas de soya bajo tres niveles de NaCl



Nota. Las barras representan la media $\pm$ EPM ($n = 6$). Letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos según Tukey al 5 %.

En conjunto, el aumento de la pérdida de agua gravimétrica y la reducción de la materia seca indican que la exposición a 100 mM alteró la relación entre tejido hidratado y sólidos acumulados, además de limitar la producción de biomasa durante los ocho días del ensayo.

3.4. Síntesis de la respuesta relativa

La **Tabla 4** integra los cambios porcentuales de los tratamientos salinos respecto del control. El tratamiento de 50 mM produjo variaciones moderadas en la mayoría de las variables, pero redujo cerca de un tercio la proporción de plántulas normales. El tratamiento de 100 mM afectó todas las variables de establecimiento, con disminuciones superiores al 40 % en plántulas normales, brote, masa seca radicular y masa seca aérea.

Tabla 4
Cambio relativo de los tratamientos salinos respecto del control

Variable	50 mM vs. 0 mM	100 mM vs. 0 mM
Germinación al día 5	-1,9 %	-5,5 %
Plántulas normales al día 8	-30,6 %	-45,0 %
Longitud del brote	-14,8 %	-62,0 %
Longitud de la raíz	-11,6 %	-41,3 %
Pérdida de agua	+2,1 %	+10,6 %
Masa seca radicular	-14,3 %	-57,1 %
Masa seca aérea	-15,1 %	-40,4 %

Nota. Los cambios se calcularon con las medias de cada tratamiento. Los valores negativos indican disminución y los positivos incrementos respecto del control.

4. Discusión

La germinación al quinto día se mantuvo por encima de 88 % en todo el gradiente y no mostró diferencias estadísticas, lo que indica que las semillas conservaron la capacidad de iniciar el proceso germinativo hasta 100 mM de NaCl. Esta estabilidad temprana no implica ausencia de estrés. En soya, la respuesta puede variar con la concentración, el vigor inicial del lote y el genotipo, y un primer conteo elevado puede coexistir con deterioro posterior del desarrollo (Zhou et al., 2023; Han et al., 2025; Gobade et al., 2025). La marcada disminución de plántulas normales demuestra precisamente esa diferencia entre inicio de germinación y establecimiento funcional. El descenso de 83,33 % en el control a 45,83 % con 100 mM revela que una parte considerable de las semillas que iniciaron la germinación no produjo estructuras con calidad suficiente al octavo día. Este resultado respalda la evaluación conjunta recomendada por ISTA (2026) y coincide con revisiones que señalan la necesidad de combinar porcentaje de germinación, vigor, crecimiento y otros rasgos para caracterizar la tolerancia salina en soya (Guan et al., 2024).

El crecimiento respondió de forma no lineal. La concentración de 50 mM produjo reducciones moderadas sin separación estadística del control, mientras que 100 mM limitó de manera clara la elongación del brote y de la raíz. Estudios con varios cultivares describieron reducciones dependientes de la concentración en longitud, peso y desempeño fisiológico, aunque la magnitud cambia entre materiales (Begum et al., 2022; Kokebie et al., 2024). La mayor reducción relativa del brote observada en este estudio puede reflejar una restricción intensa de la expansión celular y de la movilización de reservas hacia la parte aérea.

La salinidad también alteró la acumulación de biomasa. La caída de la masa seca radicular a 100 mM fue mayor que la de la parte aérea, lo que confirma la sensibilidad de la raíz, órgano expuesto directamente al medio salino. Los mecanismos propuestos incluyen

reducción del potencial hídrico, desbalance de Na^+ y K^+ , alteración de membranas y mayor demanda de ajuste osmótico y defensa antioxidante (Isayenkov & Maathuis, 2019; Van Zelm et al., 2020). Por otra parte, el aumento de la pérdida de agua calculada gravimétricamente debe interpretarse con cautela: al derivarse de la relación entre masa fresca y seca, puede estar influido por la menor acumulación de sólidos y no equivale por sí solo a una medición fisiológica de deshidratación.

Los resultados poseen utilidad como evaluación preliminar de un lote comercial, pero no permiten asignar una categoría genética definitiva de tolerancia. La literatura muestra que la selección de soya frente a salinidad requiere comparar germoplasma identificado y, cuando sea posible, integrar marcadores o regiones genómicas relacionadas con la respuesta (Chen et al., 2024; Wang et al., 2024; Xu et al., 2024). Asimismo, genes asociados con señalización, defensa y homeostasis pueden modificar la respuesta, lo que explica por qué un único lote no representa la variabilidad de la especie (Liu et al., 2023; Feng et al., 2023).

Entre las limitaciones del estudio se encuentran la identidad varietal no declarada, la evaluación de un solo lote y una única fase de desarrollo, la ausencia de mediciones directas de conductividad eléctrica y pH de las soluciones durante el ensayo y la falta de validación en sustrato o campo. Aun con estas restricciones, la coherencia entre normalidad de plántulas, crecimiento y biomasa permite sostener que 100 mM fue el nivel más restrictivo y que el primer conteo de germinación, por sí solo subestimaron el daño temprano.

5. Conclusiones

- El objetivo de evaluar la respuesta temprana de semillas de soya a tres niveles de NaCl fue alcanzado mediante un conjunto de indicadores complementarios. La germinación al quinto día se mantuvo elevada y no discriminó estadísticamente los tratamientos; en cambio, el porcentaje de plántulas normales reveló una reducción progresiva desde 50 mM y fue uno de los indicadores más sensibles del ensayo.
- La concentración de 100 mM produjo la respuesta más restrictiva, con disminuciones marcadas en la longitud del brote, la longitud de la raíz y la masa seca radicular y aérea, además de un aumento en la pérdida de agua estimada gravimétricamente. Estos cambios evidencian que la capacidad de iniciar la germinación no garantiza un establecimiento satisfactorio bajo salinidad.
- El aporte principal del estudio consiste en demostrar que la evaluación temprana de salinidad en soya debe integrar normalidad de plántulas, crecimiento y biomasa, en lugar de depender exclusivamente del primer conteo de germinación. Los resultados constituyen una base para comparar genotipos identificados y validar la respuesta en condiciones de invernadero y campo, pero no deben

extrapolarse a una variedad específica mientras no se conozca la identidad genética del lote.

6. Conflicto de intereses

Las autoras manifiestan que no existe conflicto de intereses en relación con el artículo presentado.

7. Derechos de autor (copyright)

Los autores son los titulares de los derechos de autor (patrimoniales y/o de explotación) de los contenidos de la revista (*copyright*).

8. Declaración de contribución de los autores

Los autores declaran haber participado de manera equitativa y sustancial en la realización de esta investigación, bajo las responsabilidades según la [Taxonomía CRediT](#) para describir las contribuciones individuales de cada autor al trabajo.

Diana Ramírez realizó la conceptualización de la investigación, organización y ejecución del ensayo, recopilación y curación de los datos, revisión del análisis estadístico, interpretación de los resultados, elaboración del borrador original, preparación de tablas y figuras, revisión crítica del contenido y aprobación de la versión final del manuscrito. Gabriela Ajila realizó la supervisión académica y metodológica de la investigación, brindó orientación durante el desarrollo del ensayo, revisó el análisis y la interpretación de los resultados, efectuó la revisión crítica del manuscrito, realizó la corrección científica y académica y aprobó la versión final para su publicación.

Divulgación de la delegación a la IA generativa

Las autoras declaran que emplearon ChatGPT (OpenAI, GPT-5.5) como herramienta de apoyo para reorganizar y reformular editorialmente el manuscrito original, corregir el estilo, traducir el resumen al inglés y comprobar el cumplimiento formal del formato de la revista. Los datos experimentales, el diseño, los resultados estadísticos y las decisiones científicas proceden de la investigación de las autoras y no fueron generados ni modificados por la herramienta. Las autoras revisaron, contrastaron y aprobaron cada sección y asumen la responsabilidad íntegra del contenido final. La herramienta no figura como autora ni asume responsabilidad por los resultados.

Declaración presentada por: Diana Karina Ramírez Andrade.

9. Costos de financiamiento

La presente investigación fue financiada en su totalidad con fondos propios de los autores.

10. Costos de financiamiento

La presente investigación fue financiada en su totalidad con fondos propios de las autoras y no recibió financiamiento externo específico.

11. Referencias bibliográficas

- Alzahrani, Y. (2024). Evaluation of drought and salinity tolerance potentials of different soybean genotypes based upon physiological, biochemical, and genetic indicators. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1466363. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1466363>
- Arciniega Alvarado, G. A., Jaramillo Jaramillo, F. L., & Muñoz García, P. L. (2018). Diseño y desarrollo de un producto funcional de consumo (pan) a base de soya, máchica, amaranto y chía. *Ciencia Digital*, 2(2), 391-404. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v2i2.103>
- Begum, N., Hasanuzzaman, M., Li, Y., Akhtar, K., Zhang, C., & Zhao, T. (2022). Seed germination behavior, growth, physiology and antioxidant metabolism of four contrasting cultivars under combined drought and salinity in soybean. *Antioxidants*, 11(3), 498. <https://doi.org/10.3390/antiox11030498>
- Chen, L., Peng, L., Ouyang, W., Yao, H., Ye, Y., Shan, Z., Cao, D., Chen, S., Yang, Z., Huang, Y., Han, B., Sha, A., Zhou, X., & Chen, H. (2024). Screening and identification of salt tolerance soybean varieties and germplasms. *Oil Crop Science*, 9(3), 204-210. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2024.06.005>
- Feng, C., Gao, H., Zhou, Y., Jing, Y., Li, S., Yan, Z., Xu, K., Zhou, F., Zhang, W., Yang, X., Hussain, M. A., & Li, H. (2023). Unfolding molecular switches for salt stress resilience in soybean: recent advances and prospects for salt-tolerant smart plant production. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1162014. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1162014>
- Gaibor Vallejo, L. M., Carrasco Schuldt, Ángel S., Núñez Rodríguez, P. J., Flores Cadena, C. A., Vargas Guillén, P. I., & Méndez Parra, K. M. (2024). Análisis sensorial y nutricional de un manjar elaborado con leche de vaca y bebida vegana de soya (*Glycine max*), quinoa (*Chenopodium quinoa*) y lenteja (*Lens culinaris*). *Alfa Publicaciones*, 6(1.1), 112–127. <https://doi.org/10.33262/ap.v6i1.1.459>
- Gobade, A., Arathi, S., Gijare, S., Pawar, D., & Patil, A. (2025). Evaluating salt tolerance in soybean core collection: germination response under salinity stress. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 72(2), 2059–2076. <https://doi.org/10.1007/s10722-024-02081-5>
- Guan, R.-X., Guo, X.-Y., Qu, Y., Zhang, Z.-W., Bao, L.-G., Ye, R.-Y., Chang, R.-Z., & Qiu, L.-J. (2024). Salt tolerance in soybeans: focus on screening methods and genetics. *Plants*, 13(1), 97. <https://doi.org/10.3390/plants13010097>

- Han, L., Ge, L., Fei, L., Huang, C., Li, Y., Fan, W., Zhu, D., & Zhao, L. (2025). A comprehensive evaluation of soybean germplasm resources for salt tolerance during germination. *Plants*, 14(5), 791. <https://doi.org/10.3390/plants14050791>
- International Seed Testing Association (ISTA). (2026). *International rules for seed testing*. <https://www.seedtest.org/en/publications/international-rules-seed-testing.html>
- Isayenkov, S. V., & Maathuis, F. J. (2019). Plant salinity stress: many unanswered questions remain. *Frontiers in Plant Science*, 10, 80. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00080>
- Kokebie, D., Enyew, A., Masresha, G., Fentie, T., & Mulat, E. (2024). Morphological, physiological, and biochemical responses of three different soybean (*Glycine max* L.) varieties under salinity stress conditions. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1440445. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1440445>
- Liu, L., Wang, J., Zhang, Q., Sun, T., & Wang, P. (2023). Cloning of the soybean GmNHL1 gene and functional analysis under salt stress. *Plants*, 12(22), 3869. <https://doi.org/10.3390/plants12223869>
- Oñate Mancero, F. J., Bravo Calle, O., Vaca Zambrano, E., & Toapanta Santacruz, S. (2019). Semillas de siratro (*Macroptilium atropurpureum*) sometidas a escarificación química y térmica. *Ciencia Digital*, 3(3.1), 167-175. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.1.683>
- Van Zelm, E., Zhang, Y., & Testerink, C. (2020). Salt tolerance mechanisms of plants. *Annual review of plant biology*, 71, 403–433. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100005>
- Wang, J., Zhou, M., Zhang, H., Liu, X., Zhang, W., Wang, Q., Jia, Q., Xu, D., Chen, H., & Su, C. (2024). A genome-wide association analysis for salt tolerance during the soybean germination stage and development of KASP markers. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1352465. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1352465>
- Xu, R., Yang, Q., Liu, Z., Shi, X., Wu, X., Chen, Y., Du, X., Gao, Q., He, D., Shi, A., Tao, P., & Yan, L. (2024). Genome-wide association analysis and genomic prediction of salt tolerance trait in soybean germplasm. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1494551. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1494551>
- Zhou, X., Tian, Y., Qu, Z., Wang, J., Han, D., & Dong, S. (2023). Comparing the salt tolerance of different spring soybean varieties at the germination stage. *Plants*, 12(15), 2789. <https://doi.org/10.3390/plants12152789>

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Alfa Publicaciones**.



El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Alfa Publicaciones**.



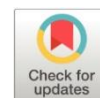
Open policy finder
Formerly Sherpa services



Tolerancia del cultivo de maní (*Arachis hypogaea* L.) al estrés salino en función del rendimiento germinativo

*Tolerance of the peanut crop (*Arachis hypogaea* L.) to saline stress as a function of germination performance*

- ¹ Adrian Alexander Ibarra Chevez  <https://orcid.org/0009-0006-0899-1517>
Universidad Técnica de Machala (UTMACH), Machala, Ecuador.
Maestría en Agronomía, Mención Producción Vegetal
aibarra2@utmachala.edu.ec
- ² Gabriela Eugenia Ajila Celi  <https://orcid.org/0000-0001-8019-2599>
Universidad Técnica de Machala (UTMACH), Machala, Ecuador.
Maestría en Agronomía, Mención Producción Vegetal
geajila@utmachala.edu.ec



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 14/05/2026

Revisado: 15/06/2026

Aceptado: 28/07/2026

Publicado: 18/08/2026

DOI: <https://doi.org/10.33262/ap.v8i3.708>

Cítese:

Ibarra Chevez, A. A., & Ajila Celi, G. E. (2026). Tolerancia del cultivo de maní (*Arachis hypogaea* L.) al estrés salino en función del rendimiento germinativo. AlfaPublicaciones, 8(3), 85–101. <https://doi.org/10.33262/ap.v8i3.708>



ALFA PUBLICACIONES, es una revista multidisciplinar, **trimestral**, que se publicará en soporte electrónico tiene como **misión** contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://alfapublicaciones.com>

La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec

Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons Attribution Non Commercial No Derivatives 4.0 International. Copia de la licencia: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Palabras claves:

Arachis hypogaea
L.; estrés salino;
NaCl;
germinación;
crecimiento inicial;
biomasa seca.

Resumen

Introducción. El maní (*Arachis hypogaea* L.) es una leguminosa oleaginosa de importancia mundial, altamente sensible a la salinidad del suelo. A nivel global, el 6-7% de la superficie terrestre enfrenta problemas de salinidad, afectando significativamente la agricultura, especialmente en América Latina donde 31 millones de hectáreas están comprometidas. La fase germinativa es particularmente susceptible al estrés salino, provocando desequilibrio osmótico y toxicidad iónica que comprometen procesos fisiológicos esenciales. **Objetivo.** El objetivo fue evaluar la tolerancia a la salinidad en semillas de maní bajo concentraciones de 0, 50 y 100 mM de NaCl, mediante porcentaje de germinación, longitud de raíz y tallo, y biomasa seca. **Metodología.** Se empleó un diseño completamente aleatorizado con la variedad INIAP 383 Pintado, utilizando seis repeticiones por tratamiento. Las semillas fueron desinfectadas y germinadas en papel Germitest bajo condiciones controladas ($25.8 \pm 2^{\circ}\text{C}$) durante 10 días. Se evaluaron porcentajes de germinación, crecimiento y análisis mineral. **Resultados.** Los resultados mostraron a 50 mM de NaCl, la germinación a los cinco días no difirió estadísticamente del control; sin embargo, al décimo día se redujo significativamente a 72.50%. La concentración de 100 mM provocó reducciones drásticas en todas las variables: germinación (50.33%), longitud radicular (3.49 cm), y biomasa, acompañadas de acumulación de Na^+ (2036.30 ppm) y disminución de la relación K^+/Na^+ (0.05). **Conclusión.** Se concluye que el maní presenta tolerancia moderada al estrés salino durante la germinación bajo 50 mM de NaCl, mientras que 100 mM compromete significativamente la germinación, crecimiento inicial y equilibrio iónico de las plántulas. **Área de estudio general:** Ciencias agronómicas. **Área de estudio específica:** Fisiología vegetal y tecnología de semillas. **Tipo de estudio:** Artículos originales.

Keywords:

Arachis hypogaea
L.; salt stress;
NaCl;
germination;
initial growth;

Abstract

Introduction. Peanuts (*Arachis hypogaea* L.) are an oilseed legume of global importance, highly sensitive to soil salinity. Globally, 6–7% of the Earth's land surface faces salinity problems, significantly impacting agriculture, especially in Latin America where 31 million hectares are affected. The germination

dry biomass.

phase is particularly susceptible to saline stress, causing osmotic imbalance and ionic toxicity that compromise essential physiological processes. **Objective.** The objective was to evaluate the salinity tolerance of peanut seeds under NaCl concentrations of 0, 50, and 100 mM, by measuring germination percentage, root and stem length, and dry biomass. **Methodology.** A completely randomized design was used with the INIAP 383 Pintado variety, with six replicates per treatment. The seeds were disinfected and germinated on Germitest paper under controlled conditions ($25.8 \pm 2^{\circ}\text{C}$) for 10 days. Germination percentages, growth, and mineral analysis were evaluated. **Results.** The results showed that at 50 mM NaCl, germination at five days did not differ statistically from the control; however, by the tenth day it was significantly reduced to 72.50%. The 100 mM concentration caused drastic reductions in all variables: germination (50.33%), root length (3.49 cm), and biomass, accompanied by Na^{+} accumulation (2036.30 ppm) and a decrease in the $\text{K}^{+}/\text{Na}^{+}$ ratio (0.05). **Conclusion.** It is concluded that peanuts exhibit moderate tolerance to saline stress during germination under 50 mM NaCl, while 100 mM significantly compromises germination, initial growth, and seedling ionic balance. **General Area of Study:** Agronomic sciences. **Specific area of study:** Plant physiology and seed technology. **Type of study:** Original articles.

1. Introducción

El maní (*Arachis hypogaea* L) es una de las leguminosas oleaginosas más importantes del mundo, destacándose por su elevado contenido de aceite, proteínas y compuestos bioactivos (Gelaye & Luo, 2024). Este cultivo es especialmente sensible a la textura del suelo, prosperando en suelos franco arenosos con un pH idealmente entre seis y siete (Macias et al., 2024).

A nivel mundial, alrededor del 6-7% de la superficie terrestre enfrenta problemas relacionados con la salinidad, lo que impacta considerablemente la agricultura en áreas templadas, húmedas y subhúmedas (Meena et al., 2016). En América Latina la salinidad constituye una de las principales limitantes para la producción agrícola, afectando millones

de hectáreas, con impactos localizados especialmente en zonas costeras (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2024).

La fase germinativa de las leguminosas es especialmente susceptible al estrés salino, dado que este provoca un desequilibrio osmótico que complica la absorción de agua y afecta la viabilidad de las semillas (Atta et al., 2023; Patel et al., 2025). Este fenómeno limita la productividad agrícola en regiones áridas y semiáridas, donde la salinidad del suelo, principalmente por cloruro de sodio NaCl, provoca toxicidad iónica y estrés osmótico, afectando procesos fisiológicos esenciales como la absorción de nutrientes y el crecimiento (Zou et al., 2025).

La salinidad interfiere en la germinación al alterar la producción de giberelinas y aumentar el ácido abscísico, lo que a su vez afecta la permeabilidad de las membranas y el comportamiento del agua en las semillas (Uçarlı, 2021). Además, el estrés salino provoca un desequilibrio nutricional que limita el crecimiento de raíces y tallos (Mazón-Suástegui et al., 2020).

La salinidad del suelo puede generarse de manera natural por la erosión de rocas y la acumulación de sales solubles (Torres & Durango, 2016). Este estrés afecta no solo la transpiración y el crecimiento celular, sino también la germinación, que es crítica para el desarrollo inicial de la planta (Meloni et al., 2004; Shrivastava & Kumar, 2015).

En este contexto, el objetivo fue evaluar la tolerancia a la salinidad en semillas de maní con diferentes concentraciones 0, 50 y 100 mM de NaCl mediante el porcentaje de germinación, longitud de la raíz y tallo, así como la biomasa seca de las plántulas. Se planteó como hipótesis que el aumento en los niveles de salinidad influya notablemente en la reducción de la capacidad germinativa de las semillas, así como en el desarrollo de raíces, tallos y en la acumulación total de biomasa, generando variaciones entre los tratamientos analizados.

2. Metodología

Se realizó un estudio cuantitativo empleando un diseño completamente aleatorizado con tres tratamientos correspondientes a diferentes niveles de salinidad 0 mM (control), 50 mM y 100 mM de NaCl. Se realizaron seis unidades experimentales por tratamiento con un total de 18 unidades experimentales en estudio.

2.1. Material biológico y condiciones del ensayo

Se utilizó la variedad de maní (*Arachis hypogaea* L) INIAP 383 Pintado, las semillas fueron previamente seleccionadas visualmente para su homogeneidad del ensayo. El estudio se llevó a cabo en el laboratorio de suelos de la Universidad Técnica de Machala (UTMACH), en la Facultad de Ciencias Agropecuarias, ubicada en el cantón Machala, provincia de El Oro, Ecuador.

2.2. Preparación de los tratamientos

Las semillas fueron desinfectadas con hipoclorito de sodio al 1% durante cinco minutos, seguidas de un enjuague con agua destilada, repitiendo este proceso cinco veces. La prueba

de germinación se realizó utilizando el papel Germitest, colocando 50 semillas por unidad experimental con soluciones salinas preparadas a partir de NaCl disuelto en agua destilada. En el tratamiento control se utilizó agua destilada, para los tratamientos salinos se disolvió 1.46 g para 50 mM y 2.92 g para 100 mM de NaCl en 500 mL de agua destilada como solución. Posterior se midió la conductividad eléctrica de las soluciones salinas preparadas:

- 0 mM conductividad eléctrica de $50 \mu\text{S cm}^{-1}$ (0.05 dS m^{-1})
- 50 mM conductividad eléctrica de $5320 \mu\text{S cm}^{-1}$ (5.32 dS m^{-1})
- 100 mM conductividad eléctrica de $10500 \mu\text{S cm}^{-1}$ (10.5 dS m^{-1})

La cantidad de solución aplicada fue equivalente a tres veces el peso del papel seco, que fue de 2.78 gramos en secos y 8.34 gramos en húmedo. Los rollos se colocaron en fundas herméticas de polipropileno y se mantuvieron en condiciones controladas, con una temperatura promedio de $25.8 \pm 2^\circ\text{C}$, humedad relativa del 51.75% y un fotoperiodo de 12 horas luz y 12 horas de oscuridad, durante un periodo de 10 días, para reducir la evaporación.

2.3. Variables evaluadas

Durante el ensayo se evaluaron las siguientes variables:

- Porcentaje de germinación a los cinco días: se registró el número total de semillas germinadas (definidas como aquellas con al menos un centímetro de radícula visible) y no germinadas en relación con el total de semillas en cada unidad y tratamiento.
- Porcentaje de germinación a los diez días: se consideraron las semillas que no germinaron a los cinco días, aplicando los mismos criterios que en la evaluación a cinco días.
- Longitud de la raíz: se seleccionaron 10 plántulas al azar de cada unidad experimental por tratamiento, midiendo la longitud de la radícula desde la base hasta la punta con una regla milimétrica, registrando los datos en centímetros.
- Longitud del tallo: se midió la longitud del tallo de estas 10 plántulas seleccionadas anteriormente, considerando la longitud desde la base radicular hasta el cotiledón, registrando los datos en centímetros.
- Masa seca de la raíz y parte aérea: se realizó una selección aleatoria de 10 plántulas por unidad experimental en cada tratamiento. Las plántulas fueron separadas en sus respectivas estructuras (raíz y parte aérea) y pesada en una balanza de precisión para obtener el peso fresco. Posteriormente, se secaron en estufa a 65°C durante 24 horas hasta alcanzar un peso constante. Las muestras se volvieron a pesar y los valores finales se utilizaron para calcular la masa seca, expresada en gramos por tratamiento.
- Análisis de concentración mineral: con base en la masa seca total, las muestras fueron enviadas a un laboratorio químico para determinar el porcentaje de concentración de Na^+ Cl^- y K^+ absorbidos en los tratamientos establecidos.

2.4. Análisis estadístico

El análisis de varianza (ANOVA) se realizó utilizando el software estadístico AgroEstat para determinar diferencias significativas entre tratamientos. Posteriormente, se aplicó la prueba de Tukey al 5% de probabilidad ($p \leq 0.05$) para la comparación de medias. Las figuras se generaron con RStudio utilizando las librerías ggplot2 y gridExtra.

3. Resultados

Los resultados de este estudio proporcionan una visión integral sobre el impacto del estrés salino en el crecimiento y desarrollo de las plántulas de maní. A través de análisis cuantitativos, se examinan las variaciones en la germinación, la longitud de raíces y tallos, así como la acumulación de biomasa bajo diferentes concentraciones de NaCl, además, se evalúa la relación K^+/Na^+ . Estos hallazgos son cruciales para comprender como la salinidad influye en la fisiología del maní y para desarrollar estrategias efectivas de manejo agronómico.

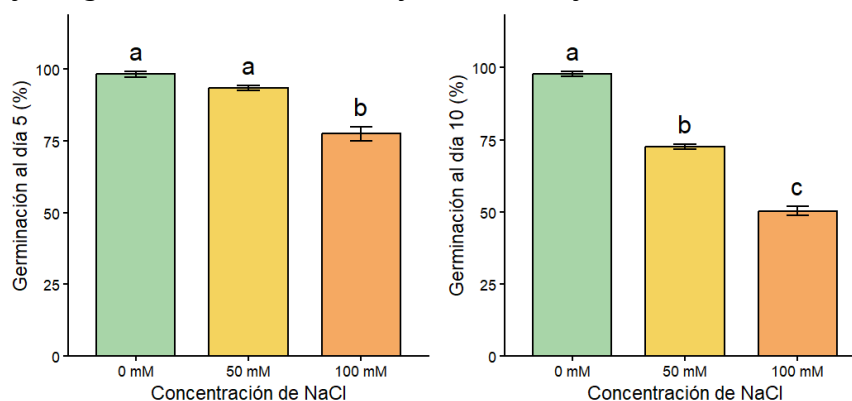
3.1. Porcentaje de germinación a los cinco y diez días

El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos para la germinación a los cinco días ($F=47.70$; $P<0.0001$). El tratamiento control 0 mM NaCl presentó una germinación promedio de 98.33%, mientras que el tratamiento con 50 mM NaCl alcanzó 93.50%, sin diferencias estadísticas respecto al control según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Por el contrario, la aplicación de 100 mM NaCl redujo significativamente la germinación hasta 77.50%, difiriendo estadísticamente del resto.

En consecuencia, la germinación a los diez días disminuyó significativamente conforme aumentó la concentración de NaCl, como se muestra en la **Figura 1**, mientras que el tratamiento control alcanzó una germinación de 97.83%, las concentraciones de 50 y 100 mM, redujeron la germinación hasta el 72.50% y 50.33%. Disminuyendo un 25.9% y 48.6% del tratamiento control.

Figura 1

Porcentaje de germinación a los cinco y diez días bajo tres niveles de NaCl en maní



Nota: Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar. Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas entre tratamientos según Tukey al 5 %.

3.2. Longitud de la raíz y tallo

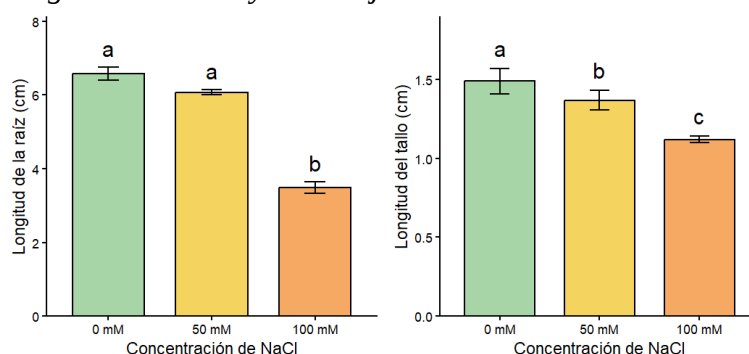
Para la longitud de la raíz también se observaron diferencias altamente significativas ($p<0.0001$). El tratamiento control 0 mM NaCl registró la mayor longitud radicular con 6.58 cm, seguido del tratamiento 50 mM NaCl con 6.07 cm, ambos estadísticamente similares,

mientras que el tratamiento 100 mM de NaCl presentó una reducción marcada con 3.49 cm, difiriendo significativamente del resto de tratamientos.

En cuanto a la longitud del tallo, presentó diferencias altamente significativas ($p=0.0011$). Como se observa en la **Figura 2** el tratamiento control 0 mM NaCl, mostró la mayor longitud de tallo con 1.49 cm, diferenciándose significativamente del resto. El tratamiento de 50 mM NaCl alcanzó 1.37 cm, mientras que 100 mM NaCl, alcanzó el menor valor con 1.12 cm, diferenciándose significativamente cada tratamiento evaluado.

Figura 2

Longitud de la raíz y tallo bajo tres niveles de NaCl en maní



Nota: Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar. Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas entre tratamientos según Tukey al 5 %.

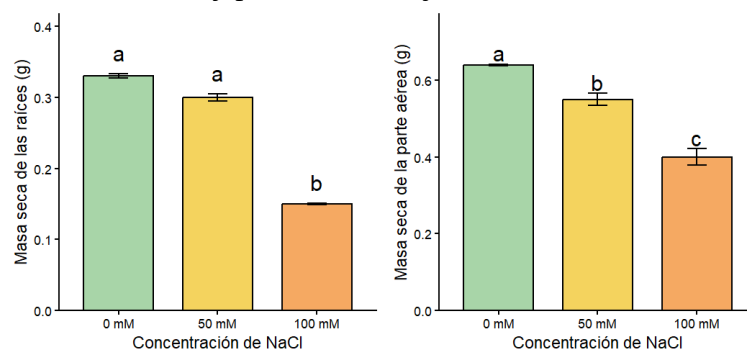
3.3. Masa seca de la raíz y parte aérea

La masa seca de la raíz presentó una disminución progresiva conforme aumentó la concentración de NaCl, registrándose el mayor valor en el tratamiento control 0 mM con 0.33 g, seguido por el tratamiento 50 mM con 0.30 g, sin diferencias estadísticas significativas entre ninguno, mientras que el tratamiento de 100 mM registró la menor acumulación de biomasa radical con 0.15 g, difiriendo significativamente entre los otros tratamientos.

Por su parte la masa seca de la parte aérea disminuyó de forma continua, conforme aumentó la concentración de NaCl, el tratamiento control 0 mM alcanzó la mayor acumulación de biomasa aérea con 0.64 g, mientras que los tratamientos sometidos a 50 y 100 mM NaCl, redujeron su biomasa a 0.55 g y 0.40 g como se evidencia en la **Figura 3**, demostrando diferencias altamente significativas entre cada uno de los tratamientos en estudio.

Figura 3

Masa seca de la raíz y parte aérea bajo tres niveles de NaCl en maní



Nota: las barras representan la media $\pm$ desviación estándar. Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas entre tratamientos según Tukey al 5 %.

3.4. Análisis mineral

La **Tabla 1** muestra los resultados del análisis mineral evidenciando que el incremento de la concentración de NaCl produjo un desbalance nutricional caracterizado por la acumulación progresiva de Na^+ y Cl^- y una marcada disminución del contenido de K_2O . Las concentraciones de 50 mM y 100 mM, en relación con el sodio incrementaron aproximadamente de 116% y 176% respecto al control. Esta elevada acumulación de Na^+ confirma que el incremento de la salinidad favoreció la absorción del sodio por las plantas.

Tabla 1

Resultados análisis mineral

Tratamientos	K_2O (%)	Cl^- (%)	Na^+ (ppm)
0 mM	0.57	0.29	738.30
50 mM	0.19	0.31	1595.10
100 mM	0.12	0.38	2036.30

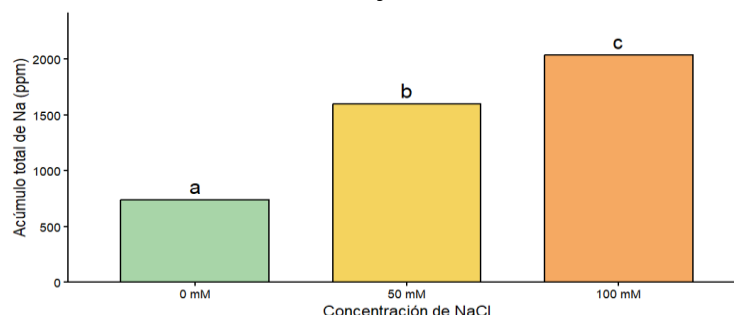
Nota: laboratorio de análisis agrícolas-NEMALAB S.A.

3.5. Concentración de sodio Na^+

El análisis de varianza indicó un efecto altamente significativo de las concentraciones de NaCl, sobre las semillas de maní, difiriendo estadísticamente entre cada uno de los tratamientos. En la **Figura 4** se observa el aumento progresivo de la concentración de sodio evidenciando que las semillas de maní absorbieron mayores cantidades de Na^+ acorde aumentó la dosis en el medio, el tratamiento control 0 mM obtuvo 738.30 ppm de Na^+ , mientras que los tratamientos 50 y 100 mM aumentaron a 1595.10 y 2036.30 ppm de Na^+ respectivamente.

Figura 4

Concentración de sodio Na^+ bajo tres niveles de NaCl en maní



Nota: letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas entre tratamientos según Tukey al 5 %.

3.6. Relación K^+/Na^+

En este estudio, se observó una disminución significativa en la relación K^+/Na^+ a medida que aumentaba la concentración de NaCl. En el tratamiento control 0 mM, la relación fue de 0.64 ppm, indicando un equilibrio relativamente favorable entre estos dos iones esenciales. Sin embargo, en condiciones de 50 mM y 100 mM de NaCl, la relación disminuyó drásticamente a 0.10 y 0.05 ppm, respectivamente como se observa en la **Tabla 2**.

Tabla 2
Relación K^+/Na^+

Tratamientos	K^+/Na^+ (ppm)
0 mM	0.64
50 mM	0.10
100 mM	0.05

3.7. Tabla de resumen de las variables

La **Tabla 3** muestra el efecto del estrés salino en diferentes concentraciones de NaCl sobre las variables de crecimiento y desarrollo de las plántulas. Los resultados evidencian que el incremento en la concentración salina afectó negativamente todos los parámetros evaluados.

Tabla 3
Resumen de las variables

Variable	0 mM	50 mM	100 mM
Germinación a los cinco días (%)	98.33 ± 1.05 a	93.50 ± 0.92 a	77.50 ± 2.35 b
Germinación a los diez días (%)	97.83 ± 0.94 a	72.50 ± 0.92 b	50.33 ± 1.52 c
Longitud de la raíz (cm)	6.58 ± 0.18 a	6.07 ± 0.07 a	3.49 ± 0.16 b
Longitud del tallo (cm)	1.49 ± 0.08 a	1.37 ± 0.06 b	1.12 ± 0.02 c
Masa seca de la raíz (g)	0.33 ± 0.003 a	0.30 ± 0.005 a	0.15 ± 0.001 b
Masa seca de la parte aérea (g)	0.64 ± 0.002 a	0.55 ± 0.016 b	0.40 ± 0.022 c
Acúmulo total de Na^+ (ppm)	738.30 c	1,595.10 b	2,036.30 a
Relación K^+/Na^+ (ppm)	0.64	0.10	0.05

Nota: letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos según Tukey al 5 %.

4. Discusión

La presente discusión aborda la influencia del estrés salino sobre la germinación y el crecimiento del maní, centrándose en varios parámetros fisiológicos y nutricionales. Además, se integran hallazgos de investigaciones recientes que analizan los mecanismos de adaptación de las semillas bajo condiciones de salinidad y la relación K^+/Na^+ . Estos estudios subrayan la importancia de comprender los mecanismos fisiológicos y bioquímicos, proporcionando un marco para el desarrollo de estrategias agronómicas que optimicen el rendimiento del cultivo en ambientes salinos.

4.1. Porcentaje de germinación a los cinco y diez días

Los resultados obtenidos muestran un impacto significativo de la salinidad en la germinación a los cinco días, el tratamiento con 50 mM de NaCl a los cinco días mantuvo una germinación del 93.50% sin diferir del tratamiento control 0 mM, sugiriendo que en las primeras etapas las reservas internas de agua pueden compensar parcialmente la restricción osmótica, evidenciando que las semillas pueden activar mecanismo de defensa que les permiten manejar temporalmente el estrés osmótico y la toxicidad iónica.

Esto es coherente con los hallazgos de Zhang et al. (2025) quienes argumentan que las primeras etapas de germinación permiten a las semillas utilizar sus recursos internos de manera más efectiva bajo condiciones de estrés. También Cao et al. (2023) y Zoungana et al. (2024) mencionan que la tolerancia parcial a esta concentración puede atribuirse a la movilización de compuestos osmoprotectores y la adaptación metabólica que las semillas pueden activar en respuesta a niveles moderados de salinidad.

La discrepancia observada en las tasas de germinación a los cinco y diez días puede explicarse por la progresiva acumulación de Na^+ , que afecta la integridad celular y la actividad metabólica. La disminución del 25.9% en la germinación a diez días en condiciones de 50 mM y del 48.6% a 100 mM sugiere que la toxicidad iónica se convierte en un factor determinante a medida que las semillas continúan su desarrollo.

Los resultados están alineados con la literatura, que indican que el estrés salino puede inducir un estado de estrés hídrico y afectar negativamente la viabilidad de las semillas (Li et al., 2021). Por su parte Desheva et al. (2020) y Zou et al. (2025) indican que un nivel alto de salinidad provoca un estrés osmótico severo que limita la absorción de agua, interfiere con la actividad enzimática y afecta negativamente la viabilidad de las semillas.

4.2. Longitud de la raíz y tallo

La longitud de la raíz y del tallo mostró una clara disminución con el aumento de las concentraciones de NaCl. A 100 mM, la longitud de la raíz se redujo a 3.49 cm y la del tallo a 1.12 cm. Esta reducción se puede relacionar con la disminución del potencial hídrico en el medio, que limita la expansión celular y provoca toxicidad iónica (Luo et al., 2021). La acumulación de NaCl en los tejidos vegetales puede interferir con la absorción de agua y nutrientes, afectando el crecimiento inicial (Li et al., 2024).

La sensibilidad del sistema radicular al estrés salino se ha documentado en estudios previos, donde se observa que la salinidad afecta primero a las raíces debido al contacto directo con

la solución salina (Liu et al., 2023). Esto corrobora la idea de que el maní, aunque puede tolerar niveles moderados de salinidad, experimenta un crecimiento comprometido a concentraciones más altas debido a la toxicidad iónica y el estrés osmótico (Zhang et al., 2024).

4.3. Masa seca de la raíz y parte aérea

La masa seca de la raíz y de la parte aérea también disminuyó con el aumento de la salinidad. El tratamiento de 100 mM de NaCl mostró una reducción significativa en la masa seca con solo 0.15 g para la raíz y 0.40 g para la parte aérea. Este comportamiento se debe a que la salinidad limita la acumulación de materia seca al afectar el metabolismo, la absorción de agua y el uso de reservas energéticas (Sharma et al., 2017; Liang et al., 2024).

La disminución en la biomasa se relaciona con la restricción del crecimiento celular y la reducción de la división celular meristemática, lo que compromete el desarrollo del sistema radical y de la parte aérea (Meguekam et al., 2022). Estas conclusiones son coherentes con estudios previos que indican que el estrés salino inhibe el crecimiento y la acumulación de biomasa en maní, afectando procesos fisiológicos clave (Singh et al., 2021; Zhiliang et al., 2025).

4.4. Análisis mineral

Los resultados del análisis mineral revelaron una acumulación significativa de NaCl a medida que aumentó la salinidad, lo que provocó un desbalance nutricional y una reducción del contenido de K_2O .

La relación K^+/Na^+ se redujo drásticamente de 0.64 en el control a 0.10 y 0.05 en los tratamientos con salinidad. Este descenso refleja que a medida que aumentan los niveles de NaCl, la entrada de Na^+ por canales/transportadores poco selectivos, combinado con la saturación de los mecanismos de exclusión resulta en una acumulación progresiva de Na^+ en las partes aéreas y radicales, lo que reduce la disponibilidad relativa de K^+ por competencia en sitios de absorción y por desplazamiento intracelular.

Estudios han descrito que a altos niveles de Na^+ , la selectividad de transportadores de alta afinidad por K^+ se ve comprometida, favoreciendo la entrada de Na^+ y reduciendo la captación neta de K^+ (Ma et al., 2022).

La caída muy pronunciada de la relación K^+/Na^+ indica que el Na^+ esta suplantado funcionalmente al K^+ en consecuencia la regulación osmótica y turgencia celular, tienen menor capacidad para mantener gradientes iónicos. La literatura evidencia que relaciones tan bajas de K^+/Na^+ suelen asociarse a reducción de eficiencia fotosintética y biomasa (Wafula et al., 2024; Li et al., 2024).

La magnitud de la caída en K^+/Na^+ (84-92%) respecto al control sugiere que la tolerancia del material estudiado a estrés salino es limitada, relaciones tan bajas suelen asociarse con reducción del crecimiento y de la eficiencia fotosintética, además de un desbalance nutricional severo (Zhang et al., 2025).

4.5. Aporte del estudio y limitaciones

Este estudio contribuye a la comprensión de la tolerancia del maní al estrés salino, destacando la importancia de las concentraciones de NaCl en la germinación, el crecimiento inicial y la acumulación de biomasa. Entre las principales limitaciones del estudio se encuentran el desarrollo del ensayo bajo condiciones controladas de laboratorio, el uso de una sola variedad de maní, el número reducido de niveles de salinidad evaluados y la ausencia de validación en condiciones de campo. Por ello, futuros estudios deberían evaluar más genotipos y condiciones de cultivo representativas.

5. Conclusiones

- Las distintas concentraciones de NaCl afectaron negativamente el rendimiento germinativo y el crecimiento inicial de las plántulas de maní, con efectos proporcionales a la dosis aplicada. 50 mM de NaCl generó un impacto limitado durante los primeros cinco días, al final del periodo de evaluación se observó una disminución significativa en la germinación y en la acumulación de biomasa, evidenciando que estas variables son las más sensibles al estrés salino moderado.
- En contraste, la concentración de 100 mM de NaCl superó la capacidad de tolerancia del cultivo, provocando reducciones significativas en todas las variables evaluadas y un marcado desbalance nutricional, caracterizado por la acumulación de Na^+ y Cl^- junto con la disminución de K^+ , lo que comprometió el crecimiento, el vigor y el equilibrio iónico de las plántulas.
- En conjunto, estos resultados indican que la variedad del cultivo posee una tolerancia moderada al estrés salino durante la germinación, capaz de sostener un desempeño aceptable bajo condiciones de 50 mM de NaCl. Sin embargo, dicha tolerancia se ve claramente superada a 100 mM, concentración que compromete de manera integral el establecimiento y desarrollo inicial del cultivo.

6. Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con el artículo presentado.

7. Derechos de autor (copyright)

Los autores son los titulares de los derechos de autor (patrimoniales y/o de explotación) de los contenidos de la revista (*copyright*).

8. Declaración de contribución de los autores

Los autores declaran haber participado de manera equitativa y sustancial en la realización de esta investigación, bajo las responsabilidades según la [Taxonomía CRediT](https://www.taxonomiaindicar.es/) para describir las contribuciones individuales de cada autor al trabajo.

Adrian Alexander Ibarra Chevez asumió la conceptualización general del estudio, el diseño y la ejecución de la fase experimental, así como el levantamiento y la depuración de la base de datos. Asimismo, se encargó de examinar el análisis estadístico, interpretar los hallazgos obtenidos, redactar la primera versión del documento, diseñar los recursos visuales tablas y figuras, evaluar de forma crítica el manuscrito y autorizar su presentación definitiva.

Gabriela Eugenia Ajila Celi fue responsable de la dirección y metodología del proyecto, ofreciendo asesoría continua a lo largo del experimento. Adicionalmente, colaboró en la revisión del análisis y discusión de los resultados, realizó la edición académica y científica del texto, aportó observaciones críticas al contenido y otorgó su aprobación final para la publicación del artículo.

Divulgación de la delegación a la IA generativa

Los autores manifiestan haber utilizado el modelo de lenguaje ChatGPT y Gemini, como herramienta de apoyo para reorganizar y reformular editorialmente el manuscrito original, corregir el estilo y comprobar el cumplimiento formal del formato de la revista. Los datos experimentales, el diseño, los resultados estadísticos y las decisiones científicas proceden de la investigación de los autores y no fueron generados ni modificados por la herramienta. Los autores revisaron y aprobaron cada sección y asumen la responsabilidad íntegra del contenido final. La herramienta no figura como autores ni asume responsabilidad por los resultados.

Declaración presentada por: Adrian Alexander Ibarra Chevez

<https://panbibliotekar.github.io/gaidet-declaration/index.html>

9. Costos de financiamiento

La presente investigación fue financiada en su totalidad con fondos propios de los autores.

10. Referencias bibliográficas

- Atta, K., Mondal, S., Gorai, S., Singh, A. P., Kumari, A., Ghosh, T., Roy, A., Hembram, S., Gaikwad, D. J., Mondal, S., Bhattacharya, S., Jha, U. C., & Jespersen, D. (2023). Impacts of saline stress on crops: Improving salt tolerance through genetic and molecular analyses. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1241736. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1241736>
- Cao, D., Ma, Y., Cao, Z., Hu, S., Li, Z., Li, Y., Wang, K., Wang, X., Wang, J., Zhao, K., Zhao, K., Qiu, D., Li, Z., Ren, R., Ma, X., Zhang, X., Gong, F., Jung, M. Y., & Yin, D. (2023). Coordinated mobilization of lipids during development and germination of peanut (*Arachis hypogaea* L.) seeds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(6), 3218–3230. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c06697>
- Desheva, G., Deshev, M., & Stamatov, S. (2020). Germination and early seedling growth characteristics of *Arachis hypogaea* L. under salinity (NaCl) stress. *Agriculture and Conspectus Scientificus*, 85(2), 113–121. https://www.researchgate.net/publication/341371403_Germination_and_Early_See

dling Growth Characteristics of Arachis hypogaea L under Salinity NaCl Stre ss

- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2024). La FAO presenta su primera gran evaluación mundial en 50 años sobre los suelos contaminados por sales. FAO. <https://www.fao.org/newsroom/detail/fao-launches-first-major-global-assessment-of-salt-affected-soils-in-50-years/es>
- Gelaye, Y., & Luo, H. (2024). Optimization of peanut (*Arachis hypogaea* L.) production: Genetic perspectives, climate adaptation, and efficient management practices: Systematic Review. *Plants*, 13(21), 2988. <https://doi.org/10.3390/plants13212988>
- Li, G., Guo, X., Sun, Y., Gangurde, S. S., Zhang, K., Weng, F., Wang, G., Zhang, H., Li, A., Wang, X., & Zhao, C. (2024). Physiological and biochemical mechanisms underlying the role of anthocyanin in acquired salt-stress tolerance in peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Frontiers in Plant Science*, 15, 1368260. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1368260>
- Li, L., Li, Q., Davis, K. E., Patterson, C., Oo, S., Liu, W., Liu, J., Wang, G., Fontana, J. E., Thornburg, T. E., Pratt, I. S., Li, F., Zhang, Z., Zhou, Y., Pan, X., & Zhang, B. (2021). Response of root growth and development to nitrogen and potassium deficiency as well as microRNA-mediated mechanism in peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Frontiers in Plant Science*, 12, 695234. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.695234>
- Liang, Q., Tan, D., Chen, H., Guo, X., Afzal, M., Wang, X., Tan, Z., & Peng, G. (2024). Endophyte-mediated enhancement of salt resistance in *Arachis hypogaea* L. by regulation of osmotic stress and plant defense-related genes. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1383545. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1383545>
- Liu, Y., Lu, J., Cui, L., Tang, Z., Ci, D., Zou, X., Zhang, X., Yu, X., Wang, Y., & Si, T. (2023). The multifaceted roles of arbuscular mycorrhizal fungi in peanut responses to salt, drought, and cold stress. *BMC Plant Biology*, 23(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04053-w>
- Luo, L., Wan, Q., Zhang, K., Zhang, X., Guo, R., Wang, C., Zheng, C., Liu, F., Ding, Z., & Wan, Y. (2021). AhABI4 proteins negatively regulate the salt-stress response in peanut. *Frontiers in Plant Science*, 12, 741641. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.741641>
- Ma, L., Liu, X., Lv, W., & Yang, Y. (2022). Molecular mechanisms of plant responses to salt stress. *Frontiers in Plant Science*, 13, 934877. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.934877>
- Macias Sornoza, A. J., Moreira Mendoza, J. M., & Muentes Rodríguez, R. B. (2024). Macronutrientes en el cultivo de maní (*Arachis hypogaea* L.): una revisión. *Revista Científica Agroindustria, Sociedad y Ambiente (A.S.A.)*, 2(23), 59.78. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14433147>

- Mazón-Suástegui, J. M., Ojeda-Silvera, C. M., García-Bernal, M., Batista-Sánchez, D., & Abasolo-Pacheco, F. (2020). Homeopathy increases tolerance to NaCl stress in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Quivicán. *Terra Latinoamericana*, 38(1), 149-163. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.584>
- Meena, H. N., Meena, M., & Yadav, R. S. (2016). Comparative yield performance of different seed types on peanut yield potential under saline irrigation. *Field Crops Research*, 196, 305–310. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.06.006>
- Meguekam, L. T., Zamfirache, M. M., Taffouo, V. D., & Jităreanu, C. D. (2022). Effect of sodium chloride on physiological and biochemical traits and the inhibition of mineral nutrition of peanut varieties under large temperature fluctuations. *Plant Stress*, 6(100123), 100123. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100123>
- Meloni, D. A., Gulotta, M. R., Martínez, C. A., & Oliva, M. A. (2004). The effects of salt stress on growth, nitrate reduction and proline and glycinebetaine accumulation in *Prosopis alba*. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 16(1), 39–46. <http://www.scielo.br/j/bjpp/a/Xqjx3WBDbTTD7DMJ97BRzLD/?lang=en>
- Patel, M., Fatnani, D., & Parida, A. K. (2025). Mineral nutrient acquisition, antioxidative defense, and metabolomic responses in divergent genotypes of *Arachis hypogaea* L. (peanut) for salinity resilience at early seedling stage. *Plant Science: An International Journal of Experimental Plant Biology*, 359(112674), 112674. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2025.112674>
- Sharma, D., Joshi, A., Jain, D., Singh, P., & Choudhary, R. (2017). Biochemical characterization of oil from peanut (*Arachis hypogaea* L.) genotypes. *International Journal of Plant & Soil Science*, 15(5), 1–5. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2017/33492>
- Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(2), 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001>
- Singh, M., Nara, U., Kumar, A., Choudhary, A., Singh, H., & Thapa, S. (2021). Salinity tolerance mechanisms and their breeding implications. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 19(1), 173. <https://doi.org/10.1186/s43141-021-00274-4>
- Torres Pérez, M., & Durango Ballesteros, E. (2019). Tolerancia al estrés salino en plantas de ñame espinoso (*Dioscorea rotundata*. Poir). In book *Biotecnología aplicada al sector agropecuario en el departamento de Sucre*, Capítulo 5. *CECAR Books*. <https://libros.cecar.edu.co/index.php/CECAR/catalog/download/52/115/1621?inline=1>
- Uçarlı, C. (2021). Effects of salinity on seed germination and early seedling stage. In S. Fahad, S. Saud, Y. Chen, C. Wu, & D. Wang (Eds.), *Abiotic Stress in Plants*. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/73200>

- Wafula, K., Kamau, N., & Odhiambo, O. (2024). Impact of soil salinity on nutrient acquisition and physiological performance of peanut (*Arachis hypogaea* L.). *International Journal of Research in Agronomy*, 7(8), 226–229. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2024.v7.i8c.5218>
- Zhang, N., Bai, B., Zuo, S., Zhang, H., Ren, J., Lv, Z., Zhou, D., & Yu, H. (2025). Comparative analysis of physiological and co-expression networks reveals potential hub genes and adaptive mechanisms responding to NaCl stress in peanut (*Arachis hypogaea* L.). *BMC Plant Biology*, 25(1), 294. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06311-5>
- Zhang, N., Zhang, H., Ren, J., Bai, B., Guo, P., Lv, Z., Kang, S., Zhao, X., Yu, H., & Zhao, T. (2024). Characterization and comprehensive evaluation of phenotypic and yield traits in salt-stress-tolerant peanut germplasm for conservation and breeding. *Horticulturae*, 10(2), 147. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10020147>
- Zhiliang, Z., Dong, T., Tao, L., Yucui, W., Xiaohua, Z., Ping, C., & Ming, Y. (2025). Biochar can promote the growth of peanuts in saline alkali soil by enhancing peanut resistance and improving soil properties. *Scientific Reports*, 15(1), 40232. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24098-1>
- Zou, K., Kang, Y. J., Ha, B.-K., Kim, K. D., Kim, K.-S., & Jun, T.-H. (2025). Genome-wide association and RNA-seq analyses reveal genes linked to salt stress in peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Frontiers in Plant Science*, 16(1699469), 1699469. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1699469>
- Zoungrana, M., Moumouni, K., Sekone, Z., Sabarikagni, S. S., Sanou, J., & Bationo, P. (2024). Early detection of salinity tolerance level of five peanut genotypes during seed germination. *Revista de Biociencias Aplicadas*, 194, 20570–20581. <https://www.m.elewa.org/journals/wp-content/uploads/2024/02/3.Zoungrana.pdf>

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Alfa Publicaciones**.



El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Alfa Publicaciones**.

