



GIAA

ISSN: 2422-0493

Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura

No. 11 Año 11 Enero 2025 Huila, Colombia



SENNOVA

Sistema de Investigación,
Desarrollo Tecnológico e Innovación



Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura
Centro de Formación Agroindustrial
No. 11; Año 11. enero de 2025. Huila, Colombia.
ISSN: 2422-0493 con el apoyo del Grupo de
Investigación Agroindustrial La Angostura.

Director de la revista

Gloria Maritza Sánchez Alarcón
gmsanchez@sena.edu.co

Comité editorial y científico

Andrea Melisa Vásquez
Claudia Mercedes Ordóñez
Yoly Dayana Moreno Ortega
Alejandra María Vélez Giraldo
Rafael David Angel Gasca

Corrección de estilo

Germán Peralta

Diseño y diagramación

Victor Montealegre

Producción Editorial

Casa Editorial Fusunga

Servicio Nacional de Aprendizaje

Directivos SENA

Jorge Eduardo Londoño Ulloa
Director General SENA

Edgar Adrián Zambrano
**Coordinador Grupo de Gestión Estratégica
de la Investigación, Desarrollo Tecnológico e
Innovación (SENNOVA)**

Adriana Milena Gasca Cardoso
Directora Regional (E) - SENA Regional Huila

Gloria Maritza Sánchez Alarcón
**Subdirectora - Centro de Formación
Agroindustrial SENA Regional Huila**

Lina Marcela Trujillo Osso
**Coordinadora Formación Profesional Centro de
Formación Agroindustrial SENA Regional Huila.**

Rafael David Angel Gasca
**Dinamizador SENNOVA, Centro de Formación
Agroindustrial**

Distribución: gratuita

Revista anual

Fecha de publicación: enero de 2025

Foto principal de carátula: Nodo editorial La Angostura

Centro de Formación Agroindustrial La Angostura, Nodo editorial La Angostura

Kilómetro 38 vía al sur de Neiva; Campoalegre (Huila).

Teléfonos.: (578) 8380191-8385060

web: <http://sena.edu.co/regionales-y-centros-de-formacion/zona-andina/Huila/Paginas/Huila.aspx>

<http://centroagroindustrial.blogspot.com>

Correo electrónico: angostura@sena.edu.co

Se autoriza la reproducción total o parcial de la obra para fines educativos siempre y cuando se cite la fuente.

4

El aprendizaje basado en proyectos como metodología de trabajo en la formación de aprendices de la Tecnoacademia Itinerante Huila

Project-based learning as a work methodology in the training of apprentices at the Itinerate Huila Technoacademy

Fabián Eduardo Girón Cruz

19

El silicio como regulador de las respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares de plantas de cultivo bajo estrés hídrico: una revisión y análisis bibliométrico

Silicon as a regulator of physiological, biochemical, and molecular responses in crop plants under water stress: a review and bibliometric analysis.

Carlos Ciceri Coronado, Yennifer Barrios Rico, Yoly Dayana Moreno Ortega, Nixon Flórez Velasco.

49

Microorganismos asociados en la fermentación y calidad de cacao

Microorganisms associated with the fermentation and quality of cocoa

Adrián Rico, Karen Lozano, Kevin Trujillo, Claudia Ordoñez, Kathryn Guzmán.

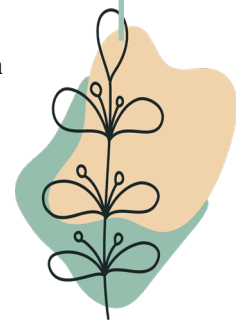
80

Mejoramiento de la fotosíntesis en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en el bosque seco tropical mediante fuentes orgánicas e inorgánicas: un análisis sobre el intercambio gaseoso, partición de biomasa y rendimiento.

Improvement of photosynthesis in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in the tropical dry forest through organic and inorganic sources: an analysis on gas exchange, biomass partitioning and yield.

Jhon Eduar Noriega Ortega, Jairo Polanía Reyes, Karen Natalia Asencio Otalora

3



El aprendizaje basado en proyectos como metodología de trabajo en la formación de aprendices de la Tecnoacademia Itinerante Huila

1

4 Project-based learning as a work methodology in the training of apprentices at the Itinerate Huila Technoacademy

Fabián Eduardo Girón Cruz¹

¹. Centro de Formación Agroindustrial, SENA, Tecnoacademia Itinerante Huila.
fegiron@sena.edu.co . <https://orcid.org/0000-0002-9442-7261>

Autor para correspondencia: fegiron@sena.edu.co

Como citar:

Girón Cruz, F. E. (2024). El aprendizaje basado en proyectos como metodología de trabajo en la formación de aprendices de la Tecnoacademia Itinerante Huila.
Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura, 11(1), 4-18.



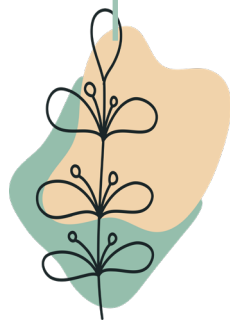
Resumen

El Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) prioriza los procesos de aprendizaje para crear contextos de enseñanza integrados. El ABP ayuda a los aprendices a desarrollar sus habilidades cognitivas, lingüísticas y creativas al fomentar su participación activa durante las sesiones de formación. Actualmente las dificultades que encontramos en nuestra sociedad nos han llevado no solo adquirir nuevo conocimiento sino a fortalecer nuestras competencias con el fin de brindar soluciones a las problemáticas de cada región. Partiendo de lo anterior, el objetivo principal de este artículo es presentar el desarrollo de un proyecto de trabajo colaborativo asentado en el aprendizaje basado en proyectos donde el núcleo central de los contenidos se basa en la solución de problemáticas de la región y el fortalecimiento de competencias en robótica. Específicamente, el proyecto realizado ha sido la implementación de un prototipo de alimentador automático para el sector piscícola llevado a cabo por aprendices de la Tecnoacademia Itinerante Huila del municipio de El Hobo del departamento del Huila.

Palabras claves: Tecnología educativa, robótica, educación media, metodologías activas, aprendizaje basado en proyectos, piscicultura, alimentación.

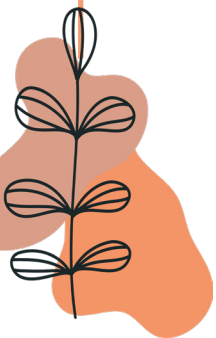
Abstract

Project Based Learning (PBL) prioritizes learning processes to create integrated teaching contexts. PBL helps trainees develop their cognitive, linguistic and creative skills by encouraging their active participation during training sessions. Currently, the difficulties we encounter in our society have led us not only to acquire new knowledge but also to strengthen our



skills in order to provide solutions to the problems of each region. Based on the above, the main objective of this article is to present the development of a collaborative work project based on project-based learning where the central core of the content is based on the solution of problems in the region and the strengthening of skills in robotics. Specifically, the project carried out has been the implementation of a prototype of an automatic feeder for the fish farming sector carried out by apprentices from the Huila traveling techno-academy in El Hobo municipality, departament of Huila.

Keywords: Educational technology, robotics, secondary education, active methodologies, project-based learning, fish farming, food.



Introducción

En la actualidad, los planteles educativos requieren que la educación sea dirigida hacia un cambio de los estilos tradicionales de enseñanza, es aquí donde las metodologías activas, particularmente el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP), han recaudado especial importancia (Mulford, 2006). El ABP, es considerado como una metodología integradora en el aula, que permite que tanto orientadores como estudiantes creen nuevos contextos educativos en los que los procesos de aprendizaje sean la prioridad (Hidalgo y Sánchez, 2022). Con base a lo anterior, enfocar la formación en robótica con una metodología orientada en un ABP garantiza que los estudiantes aprendan de forma didáctica conceptos básicos de ciencias, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM Science, Technology, Engineering, and Math) logrando consigo atraer su atención y motivación para la adquisición de nuevos conocimientos (Padilla y Martínez, 2018). De esta forma, el objetivo principal de este artículo es presentar el desarrollo de un proyecto de trabajo colaborativo asentado en el aprendizaje basado en proyectos donde el núcleo central de los contenidos se enfoca en la solución de problemáticas de la región y el fortalecimiento de competencias en robótica. Específicamente, el proyecto realizado ha sido la implementación de un prototipo de alimentador automático para el sector piscícola llevado a cabo por aprendices de la Tecnoacademia Itinerante Huila del municipio El Hobo, departamento del Huila.

Las metodologías activas.

Al hablar de metodologías activas enfocadas a la educación, se hace referencia a un conjunto de estrategias didácticas utilizadas para lograr un aprendizaje efectivo en los estudiantes (Glaser, 1991). En las metodologías activas, los alumnos cuentan con un rol diferente debido a que dejan a un lado su papel de recepcionar información en clase y regirse exclusivamente a realizar lo que se les pide, a convertirse en estudiantes empoderados por su orientador y cambiar su rol pasivo por un rol activo (Johnson et al., 2016), logrando que los estudiantes se transformen en “proveedores y consumidores” de conocimiento a través del descubrimiento, procesamiento, y aplicación de la información recibida en clase (Noguero, 2005).

Finalmente, según Toro y Arguis (2015) una metodología es considerada como activa si es caracterizada por “partir de los intereses y motivaciones de los estudiantes, si promueve la creatividad, la crítica, la cooperación y el espíritu emprendedor, si cuenta



con un medio apropiado para que los estudiantes alcancen la autonomía intelectual y moral, y por último y no menos importante el docente debe actuar como guía y facilitador del aprendizaje.”

Aprendizaje basado en proyectos (ABP).

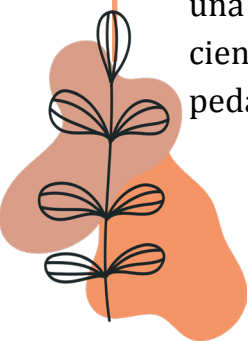
La metodología del ABP basa su esencia en el movimiento maker traído al español “aprender haciendo” de John Dewey (Pozuelos, 2007), y ha sido objeto de investigación desde sus inicios (Cobo y Valdivia, 2017). Los proyectos ABP brindan herramientas a los estudiantes para participar en actividades que involucren la resolución de problemas y la toma de decisiones. Esto les permite trabajar de forma autónoma y mantenerlos activos durante largos períodos de tiempo logrando la elaboración de presentaciones o productos funcionales (Galeana, 2006).

Según Rodríguez y Vílchez (2015), la aplicación del ABP requiere que sean los estudiantes quienes definan la elaboración de un prototipo o producto final, y adicionalmente identifiquen su mercado, realicen la investigación del tema en estudio, planifiquen las actividades para la gestión del proyecto y por último realicen un producto basado en la resolución de problemas determinados.

Las experiencias personales de los docentes sobre los beneficios de trabajar con una metodología activa de ABP en comparación con la metodología tradicional son esperanzadoras (Zambrano y Hernández, 2022) puesto que se obtiene un mejoramiento en los resultados académicos, beneficia el trabajo en equipo y afianza la toma de decisiones, alcanzando competencias más significativas (Vallina y Pérez, 2020).

La robótica como parte fundamental en la educación

La inclusión de la robótica como asignatura en la educación es esencial para el desarrollo integral de los estudiantes, ya que fomenta habilidades técnicas y cognitivas fundamentales (Gómez et al., 2017). Según la *International Society for Technology in Education* (2019), los estudiantes que participan en proyectos de robótica desarrollan una mayor capacidad para resolver problemas complejos y aplican principios de ciencias, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) de manera práctica. Este enfoque pedagógico no solo mejora su rendimiento académico, sino que también fortalece



competencias blandas como la colaboración y el pensamiento crítico, habilidades esenciales para el siglo XXI.

Además, la robótica prepara a los jóvenes para enfrentar los desafíos de un mercado laboral en constante evolución, según el *World Economic Forum* (2020), más del 50% de los empleos para 2025 requerirán competencias tecnológicas avanzadas, lo que subraya la importancia de introducir a los estudiantes a la robótica desde una edad temprana. Al adquirir estas habilidades, los estudiantes no solo mejoran sus perspectivas profesionales, sino que también se convierten en ciudadanos más adaptables e innovadores, preparados para un futuro altamente tecnológico.

El ABP aplicado en la formación de aprendices de la Tecnoacademia Itinerante Huila.

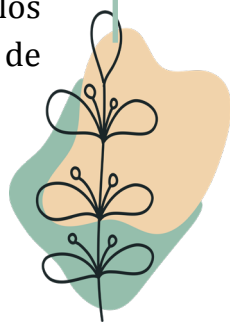
La experiencia que se presenta a continuación se cimienta en el desarrollo de las sesiones de formación de la línea de robótica de la Tecnoacademia Itinerante Huila en la Institución Educativa (IE) Roberto Suaza Marquinez del municipio de El Hobo. Concretamente las sesiones de formación se basan en los siguientes resultados de aprendizaje.

1. Resolución de problemas asociados a su región mediante el uso de productos tecnológicos.
2. Diseño e impresión en 3D.
3. Implementación de circuitos electrónicos.
5. Programación de sistemas electrónicos.
6. Divulgación de un proyecto tecnológico.

Problemática a abordar en el proyecto

Según el Sánchez (2019), el departamento del Huila es considerado como el primer productor piscícola del país con el 37% de la producción nacional, además de esto es catalogado como el departamento con mayor exportación de pescado en Colombia alcanzando una cifra cercana al 33% de la producción exportada.

Dentro de la región, los municipios que más se destacan en esta actividad son los ubicados en la zona norte del departamento, ya que, al contar con la represa de



Betania, municipios como El Hobo, Yaguará y Campoalegre, producen alrededor de 22.000 toneladas de pescado (Bonilla, 2019).

Para llegar a estos niveles de producción, las actividades de cría y levante de peces se tornan en dos etapas decisivas y muy importantes. Es por ello que, para alcanzar buenos resultados en dichas actividades, se hace necesario tener en consideración diferentes factores que permitan obtener una producción más eficiente. Uno de ellos es la alimentación, la cual se ha convertido en el agente más importante en la obtención de un mayor tamaño y peso de los peces; dos características importantes que impactan directamente en las ganancias de los piscicultores (Vásquez, 2001).

Sin embargo, en la actualidad los pequeños y medianos productores realizan el proceso de alimentación de manera manual, generando un bajo control en el proceso y trayendo consigo aumento en el tiempo y costo de la producción (Ríos, 2012). A partir de esta problemática surge la necesidad de implementar un sistema automático que sea capaz de ejecutar el proceso de alimentación de forma fiable, permanente y precisa, que permita a los piscicultores alcanzar una producción más eficiente y por ende una mayor rentabilidad.

Objetivo del proyecto

Partiendo de la problemática anteriormente descrita, la elaboración del prototipo de un alimentador automático de peces para el sector piscícola, tiene como objetivo, por una parte, que los aprendices formen conocimientos técnicos sólidos mediante el desarrollo de experiencias didácticas que permitan darle solución a un problema, y por otra, el fortalecimiento de competencias en trabajo colaborativo, emprendimiento y comunicación oral y escrita. Para alcanzar dicho efecto en los aprendices resulta importante la aplicación de la metodología de aprendizaje basado en proyectos (ABP) en las sesiones de formación en la Institución educativa.

Desarrollo de la metodología

Para alcanzar los resultados de aprendizaje descritos en el diseño curricular “Aplicación de la electrónica en proyectos de ciencia, tecnología e innovación con enfoque rural” se ha realizado una planificación en la cual se instauró a lo largo de las sesiones de formación, la metodología ABP, siendo necesario seguir una secuencia didáctica de inmersión metodológica, ver figura 1.

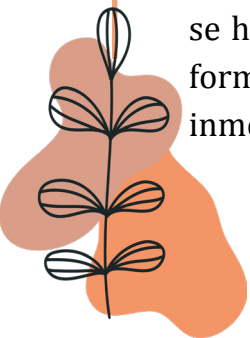


Figura 1.

Estructura y planificación del proyecto.

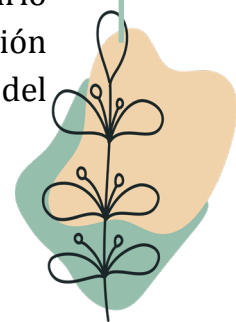


Nota. Elaboración propia.

Propuesta. Al inicio de las sesiones de formación se realizan jornadas de investigación con los aprendices donde se hace énfasis en la identificación de problemáticas de su región, adicionalmente, se hace un proceso de capacitación sobre el desarrollo teórico de la metodología didáctica, exponiendo cuáles son sus valores, objetivos y los resultados esperados.

Lluvia de ideas. Una vez concluida la etapa de investigación y capacitación del ABP, se realizan jornadas especiales para que los aprendices expongan las diversas ideas y propuestas en la cuales han trabajado, además de presentar su viabilidad para poderse ejecutar con los medios de los que dispone y proporciona la Tecnoacademia Itinerante Huila.

Sesiones de trabajo. Durante las sesiones de formación del curso complementario titulado “Aplicación de la electrónica en proyectos de ciencia, tecnología e innovación con enfoque rural” se realizaron las acciones destinadas a la implementación del



prototipo de alimentador automático. Como banco de trabajo se utilizó la sala STEM ubicada en la Institución Educativa Roberto Suaza Marquínez del municipio de El Hobo, Huila. En el interior de la sala se realizaron reuniones cuyo propósito fue establecer y programar las actividades a ejecutar durante el desarrollo de proyecto, obtenido como resultado la proyección de cuatro etapas: i) Investigación, ii) Desarrollo estructural del prototipo, iii) Implementación de la electrónica y iv) Programación.

En la etapa de investigación se realizó una revisión bibliográfica de los sistemas de alimentación para peces que actualmente pueden ser adquiridos en tiendas especializadas. De los dispositivos consultados, se encontró que la mayoría presenta características similares ya que sus diseños permiten la distribución del alimento de forma lineal mediante el movimiento de un tornillo sin fin ubicado en la tolva. Por lo tanto, se decidió que el diseño del prototipo planteado en este proyecto, permitiera la distribución del alimento de forma rotacional con un cierto radio de alcance y cobertura del lago.

Para el desarrollo estructural del prototipo, se estableció que su construcción fuera de bajo costo, logrando que la mayor cantidad de material requerido para su implementación fuera a partir del material de formación proporcionado por la Tecnoacademia Itinerante Huila. Con esta determinación, se obtuvo un diseño estructural basado en aglomerado mdf, tubería de pvc e impresión 3d con filamento PLA. Finalmente, para la automatización del prototipo, fase en donde se unifican las etapas de implementación electrónica y programación, se utilizaron sensores y actuadores (motores) del kit de biotecnología proporcionado por la Tecnoacademia Itinerante Huila, los cuales tienen como función, generar el movimiento y funcionamiento de la estructura. Para el control del prototipo se incorporó la tarjeta de desarrollo microbit encargada de ejecutar las instrucciones de funcionamiento del prototipo, tales como: i) Accionar el motor encargado del movimiento rotacional de la base del prototipo, ii) Activar o de desactivar la servoválvula encargada de permitir el paso del alimento desde la tolva hacia el conducto de distribución, iii) Encender el sistema de distribución constituido por la tubería de pvc y el blower. En las imágenes siguientes (**Figura 2**) se presenta una parte gráfica del proyecto realizado y el prototipo finalizado.

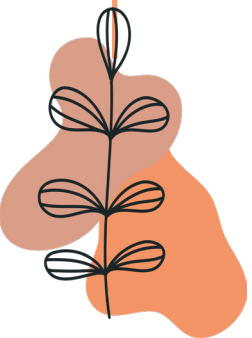
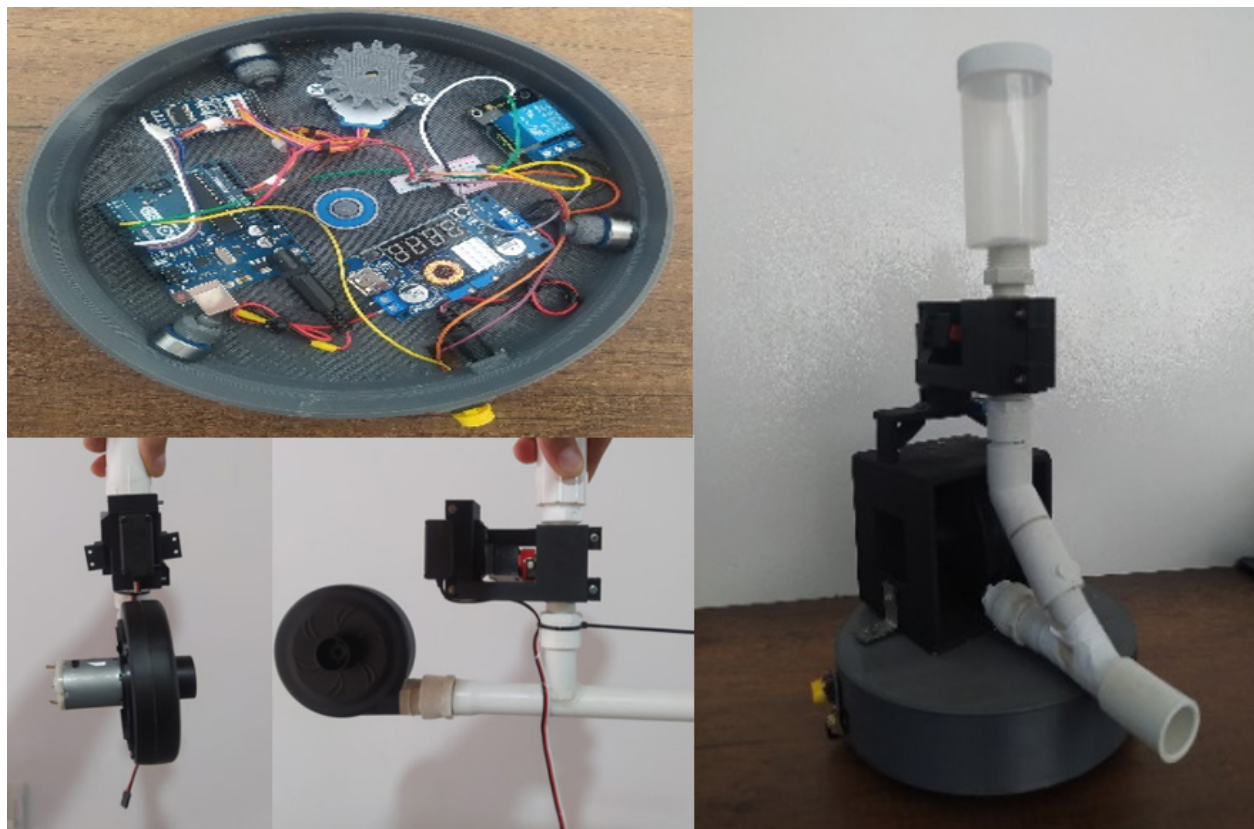


Figura 2.

Implementación del prototipo de alimentador automático para el sector piscícola.



Nota. Elaboración propia.

Valoración. Una vez concluidas las sesiones propuestas para la realización del proyecto, se destinó una sesión de valoración de la metodología, la cual fue dividida en dos fases. Para la primera se aplicó la propuesta de rúbrica de Toledo y Sánchez (2018), con la finalidad de evaluar las competencias desarrolladas en los grupos de trabajo bajo la metodología planteada ver tabla 1.

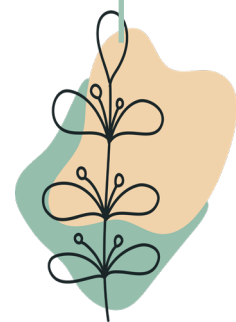


Tabla 1.

Rúbrica para evaluar las competencias desarrolladas en los grupos bajo la metodología ABP.

Aspectos a valorar	Escala de valores			
	Excelente	Bueno	Regular	Inadecuado
Planificación	Planifica el trabajo en equipo notablemente para el logro de metas comunes de proyecto.	Planifica el trabajo en equipo de forma adecuada para el logro de metas comunes de proyecto	Planifica el trabajo en equipo con poco interés para el logro de metas comunes de proyecto	Planifica el trabajo en equipo inadecuadamente para el logro de metas comunes de proyecto
Trabajo en equipo	Los miembros del grupo aprenden interactuando y comunicándose entre sí	Los miembros del grupo interactúan y se comunican adecuadamente entre sí	Los miembros del grupo en su mayoría hacen sus propias cosas de manera independiente o dejan de comunicarse con los demás	Los miembros del equipo trabajan de forma individual y no como un equipo
Contenido	La presentación muestra un notable conocimiento de los contenidos y una profunda comprensión del problema del trabajo	La presentación muestra un conocimiento bueno de los contenidos y comprensión suficiente del problema	La presentación demuestra poco conocimiento del contenido o comprensión limitada del problema investigado	La presentación no demuestra conocimiento del contenido o del problema investigado
Resultados	El resultado es creativo, práctico, y aborda a fondo el problema	El resultado es práctico y aborda el problema	El resultado es superficial y no aborda todo el problema	El resultado es insuficiente para resolver el problema
Comunicación	El equipo comunica la información, la solución, y el razonamiento de una manera eficaz y atractiva	El equipo comunica la información, la solución, y el razonamiento de una manera adecuada	El equipo no comunica uno o dos de los siguientes elementos: información, solución y razonamiento	El equipo no comunica información, solución y razonamiento

Nota. Tomado de Toledo y Sánchez (2018)

En la segunda fase, se realizaron los ensayos de funcionamiento del prototipo en el ambiente de formación de piscicultura del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura – SENA (**ver figura 3**), en diferentes sistemas de cultivo de peces. Algunos de estos sistemas requieren suministro de alimento entre 10 y 12 veces al día durante aproximadamente 30 días. Cumplir con esta labor de alimentación no es viable

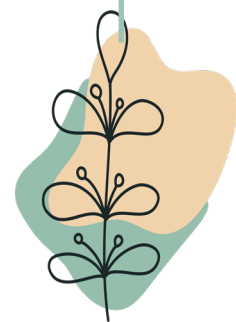
durante la jornada académica de los aprendices del Centro de Formación. Durante las pruebas fue posible identificar un mejor desempeño en la alimentación del proceso de reversión de peces, por lo que el prototipo al ser automático brindaría gran ayuda aumentando la eficiencia del proceso de reversión cumpliendo con los tiempos de alimentación requeridos. Por otra parte, los aprendices realizaron la identificación de aciertos y oportunidades de mejora del proyecto durante las pruebas realizadas, comprometiéndose a realizar las adecuaciones pertinentes para la optimización del prototipo.

Figura 3.

Pruebas del prototipo en el ambiente piscícola en el Centro de Formación Agroindustrial La Angostura.



Nota. Elaboración propia



Conclusiones

La implementación del Aprendizaje Basado en Proyectos en las sesiones de formación escolar, ofreció múltiples beneficios tanto a nivel académico como personal. En primer lugar, el ABP fomentó un aprendizaje más profundo y significativo, ya que los estudiantes se vieron desafiados a aplicar sus conocimientos teóricos en la resolución de problemas reales, en este caso la alimentación en el sector piscícola. Esto no solo mejoró la retención de los contenidos, sino que también promovió el desarrollo de habilidades prácticas, tales como la investigación, la gestión del tiempo y la toma de decisiones. Además, el trabajo colaborativo inherente a este método fortaleció las competencias blandas como la comunicación y el liderazgo, factores clave para el éxito en entornos educativos y profesionales.

Por otro lado, el ABP impulsó una mayor motivación y compromiso de los estudiantes, al permitirles involucrarse en proyectos relevantes para sus intereses y su entorno. Este enfoque centrado en el estudiante, promovió mayor autonomía y responsabilidad en el proceso de aprendizaje, transformando al estudiante en un protagonista activo de su educación. Como resultado, el ABP no solo mejora el rendimiento académico, sino que también prepara a los estudiantes para enfrentar con éxito los desafíos del mundo real, brindándoles herramientas esenciales para la resolución creativa de problemas y la adaptación a contextos dinámicos.

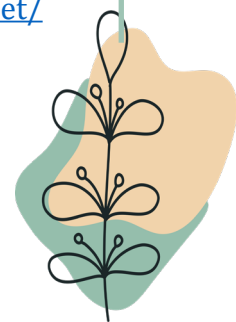
Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en competencia ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

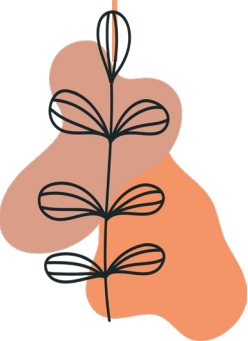


Referencias bibliográficas

- Bonilla, A. Q. (2019). Génesis de la actividad piscícola en el Huila. *Revista Academia Huilense de Historia*, (70), 89-117. <http://www.journals.academiahuilensedehistoria.org/index.php/rahh/article/view/115>
- Cobo Gonzales, G., & Valdivia Cañotte, S. M. (2017). Aprendizaje basado en proyectos. <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/170374>
- Galeana, L. (2006). Aprendizaje basado en proyectos. *Revista Ceupromed*, 1(27), 1-17
- Glaser, R. (1991). The maturing of the relationship between the science of learning and cognition and educational practice. *Learning and instruction*, 1(2), 129-144. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(91\)90023-2](https://doi.org/10.1016/0959-4752(91)90023-2)
- Gómez, A; Parramón, E; Sánchez-Seco, C. (2017). Tecnología, Programación y Robótica, 3º ESO. Proyecto Inventa. Editorial Donostiarra.
- Hidalgo, D. R., & Ortega-Sánchez, D. (2022). El aprendizaje basado en proyectos: una revisión sistemática de la literatura (2015-2022). *HUMAN REVIEW. International Humanities Review/Revista Internacional de Humanidades*, 14(6), 1-14. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8839866>
- International Society for Technology in Education. (2019). *Robotics in the classroom: Engaging students in the future of learning*. <https://www.iste.org>
- Johnson, L., Adams Becker, S., Cummins, M., Estrada, V., Freeman, A., y Hall, C. (2016). *NMC Informe Horizon 2016 Edición Superior de Educación*. Austin, Texas: The New Media Consortium.
- Mulford, B. (2006). Liderazgo para mejorar la calidad de la educación secundaria: algunos desarrollos internacionales. Profesorado. *Revista de Currículum y Formación de Profesorado*, 10(1), 0.
- Noguero, F. L. (2005). Metodología participativa en la enseñanza universitaria (Vol. 9). Narcea Ediciones. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=325183>
- Padilla, D. B., & Martínez, A. J. (2018). Experiencia didáctica con Arduino. El aprendizaje basado en proyectos como metodología de trabajo en el aula de secundaria. *Hekademos: revista educativa digital*, (25), 73-82. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6789674>



- Pozuelos, F. J. (2007). Trabajo por proyectos en el aula: descripción, investigación y experiencias. Colección colaboración pedagógica, 18, 14-75.
- Ríos, R. (2012). Cartilla Práctica para el Cultivo de Tilapia (*Oreochromis* sp.). <https://aquadocs.org/handle/1834/8121>
- Rodríguez, I. R., & Vílchez, J. G. (2015). El aprendizaje basado en proyectos: un constante desafío. *Innovación educativa*, (25). <https://doi.org/10.15304/ie.25.2304>
- Sánchez Téllez, J. P. (2019). Prospectiva de la producción y comercialización de tilapia en el Departamento del Huila al año 2029 (Master's thesis, Universidad de la Sabana). <https://intellectum.unisabana.edu.co/handle/10818/41102>
- Toledo Morales, P. y Sánchez García, J.M. (2018). Aprendizaje basado en proyectos: una experiencia universitaria. *Profesorado: Revista de curriculum y formación del profesorado*, 22 (2), 429-449. <https://doi.org/10.30827/profesorado.v22i2.7733>
- Toro, A., & Arguis, M. (2015). Metodologías activas, *A tres bandas*, (38), 69-77.
- Vallina, I., y Pérez, E. (2020). El aprendizaje basado en proyectos y las tecnologías de la información y la comunicación dentro de un centro escolar. Un estudio de caso. *EDMETIC, Revista de Educación Mediática y TIC*, 9(2), 116-136. <https://doi.org/10.21071/edmetic.v9i2.12018>
- Vásquez Torres, W. (2001). Nutrición y alimentación de Peces. <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-bac-20.500.12324-34942/Description>
- World Economic Forum. (2020). *The future of jobs report 2020*. <https://www.weforum.org>
- Zambrano Briones, M. A., Hernández Díaz, A., & Mendoza Bravo, K. L. (2022). El aprendizaje basado en proyectos como estrategia didáctica. *Conrado*, 18(84), 172-182. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1990-86442022000100172&script=sci_arttext



El silicio como regulador de las respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares de plantas de cultivo bajo estrés hídrico: una revisión y análisis bibliométrico

Silicon as a regulator of physiological, biochemical, and molecular responses in crop plants under water stress: a review and bibliometric analysis

Carlos Ciceri Coronado^{1,2,*}, Yennifer Barrios Rico²,
Yoly Dayana Moreno Ortega², Nixon Flórez Velasco²

¹ Grupo de Investigación en Biodiversidad y Desarrollo Amazónico (BYDA). Centro de Investigaciones Amazónicas MACAGUAL- César Augusto Estrada González (CIMAZ). Florencia, Colombia, caciceri@sena.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-3527-4039>

² Grupo de Investigación Agroindustrial La Angostura. Centro de Formación Agroindustrial, Regional Huila. Campoalegre, Colombia, ybarriosr@sena.edu.co, <https://orcid.org/0009-0002-2868-2229>

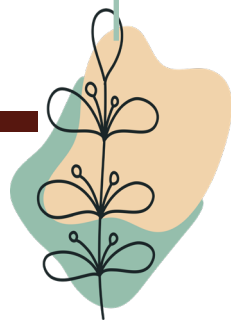
² Grupo de Investigación Agroindustrial La Angostura. Centro de Formación Agroindustrial, Regional Huila. Campoalegre, Colombia, nflorez@unal.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-0012-3484>

² Grupo de Investigación Agroindustrial La Angostura. Centro de Formación Agroindustrial, Regional Huila. Campoalegre, Colombia, ydmoreno@sena.edu.co, <https://orcid.org/0000-0001-6840-8510>

Autor para correspondencia: caciceri@sena.edu.co

Como citar:

Ciceri Coronado, C., Barrios Rico, Y., Moreno Ortega, Y. D., y Flórez Velasco, N. (2024). El silicio como regulador de las respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares de plantas de cultivo bajo estrés hídrico: una revisión y análisis bibliométrico. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*, 11(1), 19-48.



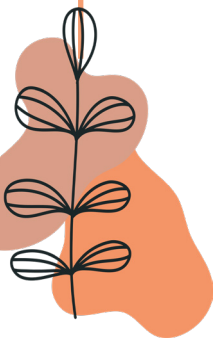
Resumen

El cambio climático ha intensificado los eventos de sequía representando una de las principales limitaciones para la productividad agrícola. Dada esta problemática, el presente estudio se justifica por la necesidad de explorar estrategias que incrementen la tolerancia de las plantas al estrés hídrico, siendo el silicio (Si) un elemento fundamental para mitigar sus efectos adversos. El objetivo de esta revisión es analizar el papel del silicio (Si) en la regulación de las respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares de plantas de cultivo bajo condiciones de sequía. Para ello, se realizó un análisis bibliométrico siguiendo las directrices de PRISMA y una revisión sistemática en las bases de datos Scopus y Web of Science, identificando un total de 100 publicaciones relevantes. Los resultados muestran que el silicio (Si) mejora la retención de agua, la eficiencia fotosintética activa, las defensas antioxidantes, y además regula la apertura estomática junto con la acumulación de osmoprotectores. Concluimos que el silicio (Si) es una herramienta prometedora para fortalecer la resiliencia de los cultivos al estrés hídrico y contribuir a la sostenibilidad agrícola, sin embargo, se requiere mayor investigación sobre sus mecanismos moleculares en diferentes especies vegetales para profundizar en su aplicación.

Palabras clave: Silicio, estrés hídrico, mecanismos de resistencia, sequía, cultivos agrícolas

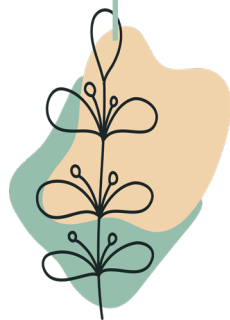
Abstract

Climate change has intensified drought events, representing one of the main limitations to agricultural productivity. Given this issue, the present study is justified by the need to explore strategies that increase plant tolerance to water stress, with silicon (Si) being a key element in mitigating its adverse effects. The general



objective of this review is to analyze the role of silicon in regulating the physiological, biochemical, and molecular responses of crop plants under drought conditions. A bibliometric analysis was conducted following PRISMA guidelines, along with a systematic review in Scopus and Web of Science databases, identifying 100 relevant publications. The results show that Si improves water retention, photosynthetic efficiency, and activates antioxidant defenses, in addition to regulating stomatal opening and the accumulation of osmoprotectants. We conclude that silicon is a promising tool to strengthen crop resilience to water stress and contribute to agricultural sustainability, although further research is needed on its molecular mechanisms in different plant species.

Keywords: Silicon, Water stress, resistance mechanisms, drought, agricultural crops



Introducción

El cambio climático contemporáneo ha intensificado la frecuencia y severidad de eventos de sequía, posicionándose como uno de los principales factores de estrés abiótico que afecta la producción agrícola a nivel mundial (Sato et al., 2024; Yang et al., 2021). La sequía no solo reduce la disponibilidad de agua, sino que además desencadena una serie de respuestas fisiológicas y moleculares en las plantas comprometiendo su crecimiento, desarrollo y rendimiento productivo (Guizani et al., 2024; Qiao et al., 2024). Entre las estrategias para incrementar la supervivencia del rendimiento de las plantas ante situaciones de estrés ambiental, se encuentra el manejo de la nutrición mineral (Ayyaz et al., 2024), donde las aplicaciones de fertilizantes a base de silicio (Si) mejoran la defensa y rendimiento de los cultivos bajo condiciones de estrés (Barão et al., 2023; Hassan et al., 2024; Tayade et al., 2022). Aunque el silicio (SI) no es un nutriente esencial, ha emergido como un elemento beneficioso para mitigar los efectos adversos del estrés abiótico (Mehta et al., 2020), mejorando la resistencia de cultivos mediante la regulación de procesos fisiológicos (Costa et al., 2024), morfológicos, bioquímicos (Cheraghi et al., 2024), y genéticos (Thakral et al., 2024), optimizando así la respuesta de las plantas ante condiciones adversas como la alta salinidad (Gill et al., 2024; Teimoori et al., 2023), el estrés térmico (Saha et al., 2021) y, especialmente el déficit hídrico (Ahsan et al., 2023; Cheraghi et al., 2024; Johnson et al., 2022; Wang et al., 2021).

El papel del silicio (SI) en la regulación de las respuestas al estrés abiótico se explica por su capacidad para influir en la expresión génica y en las rutas metabólicas asociadas a la tolerancia al estrés (Biju et al., 2023). Esta regulación incluye la estabilización de estructuras celulares, la modulación del equilibrio osmótico y la activación de sistemas antioxidantes, entre otros mecanismos (Bhardwaj & Kapoor, 2021). Con los avances recientes en herramientas genómicas y epigenéticas, se ha profundizado en la comprensión de cómo el silicio (SI) interactúa con los sistemas biológicos de las plantas para proporcionar una mayor resiliencia frente a condiciones de estrés (Mir et al., 2022; Stadnik et al., 2022). Además, su capacidad para mejorar la resistencia de los cultivos a condiciones adversas, como la sequía, contribuye a la optimización de los recursos hídricos y a una menor dependencia de insumos químicos (Kovács et al., 2022).

En este sentido, el presente artículo revisa la literatura científica disponible sobre el papel del silicio (Si) en la respuesta de las plantas al estrés hídrico, apoyando la



adaptación de la agricultura a los desafíos del cambio climático para promover prácticas sostenibles y resilientes que favorezcan la seguridad alimentaria y la conservación de los recursos naturales. Para esto, se analizaron aspectos fisiológicos y moleculares, complementando la revisión con un análisis bibliométrico que identifica las tendencias de investigación en este campo emergente.

Materiales y métodos

Diseño del estudio

El estudio se orientó por las directrices de PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis Protocol) (Park et al., 2022). Se empleó un enfoque bibliométrico para analizar las tendencias de investigación, identificar áreas clave de interés y examinar las implicaciones, direcciones políticas y futuras investigaciones relacionadas con el uso de silicio (Si) como regulador del estrés hídrico en plantas de cultivo. Este método fue seleccionado por su capacidad para ofrecer un análisis exhaustivo y cuantitativo, proporcionando valiosas perspectivas sobre estrategias y políticas aplicables (Liu et al., 2024).

Estrategia de búsqueda de literatura y selección de estudios

Se realizó una revisión sistemática el 25 de agosto de 2023 en las bases de datos Scopus (<https://www.scopus.com/>) y Web of Science (<https://clarivate.com/>). Se definieron palabras clave para formular los términos de búsqueda. Seleccionamos la ecuación: TTITLE-ABS-KEY (“silicio” AND “cultivos” AND “genes” AND “sequía”) para realizar la búsqueda. Las bases de datos descargadas de Scopus y Web of Science se combinaron en un solo archivo Excel utilizando la herramienta del paquete Bibliometrix en RStudio, y se eliminaron los documentos duplicados.

Análisis de datos y visualización

Se utilizó el paquete de R “bibliometrix” (RSB) versión 4.4.1 y el software VOSviewer (VSv) versión 1.6.20 (<https://www.vosviewer.com/>) para analizar instituciones, revistas co-citadas, países, autores, revistas, autores co-citados y co-ocurrencia de palabras clave, entre otros. RSB se utilizó para analizar la evolución temática, el número de artículos y citas a lo largo del tiempo, análisis de centralidad y densidad,



e identificación de los autores más activos en la investigación sobre la regulación del estrés hídrico mediante el silicio. Por último, VSv se empleó para analizar y visualizar redes de co-ocurrencia.

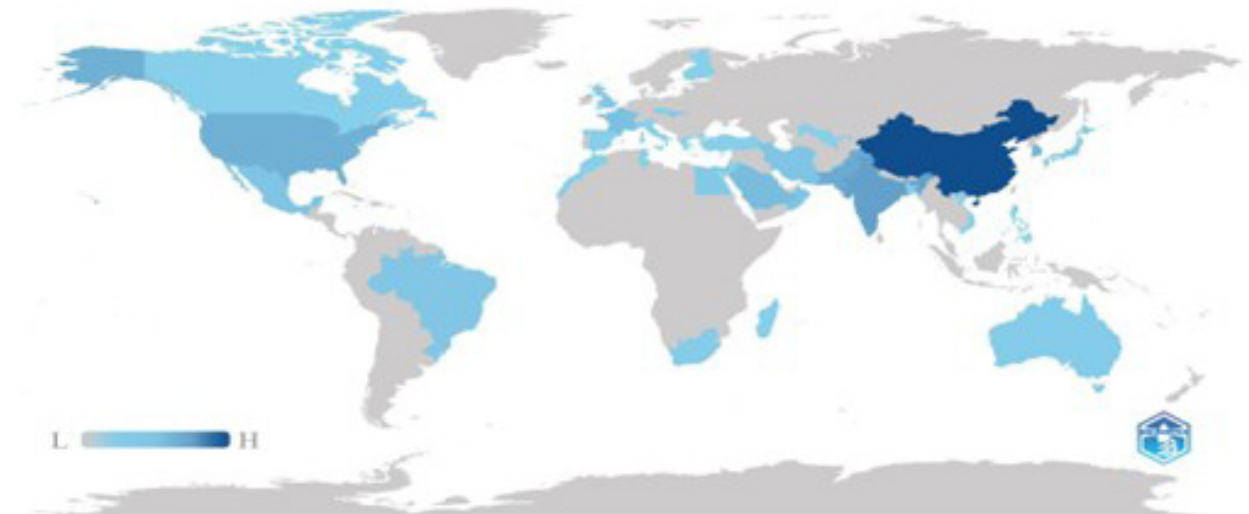
Análisis bibliométrico

Contribución científica y documentos más citados a nivel mundial

El análisis bibliométrico reveló que China lidera la producción científica en el tema relacionado con el silicio (Si) y la sequía, con un total de 100 publicaciones entre 2003 y 2023, seguido por Estados Unidos con 80 publicaciones (Figura 1). Sin embargo, a pesar del mayor volumen de publicaciones, los artículos de China han recibido menos citas, lo que podría indicar una menor influencia en la comunidad científica internacional. En términos de áreas temáticas, Estados Unidos, China e India dominan en investigación sobre mecanismos moleculares, mientras que algunos países de Europa se destacan en fisiología.

Figura 1.

Producción científica por país. La intensidad del color azul indica un mayor número de artículos. Se presenta a China como uno de los países que más investiga en temas relacionados con el silicio (Si) y la sequía.



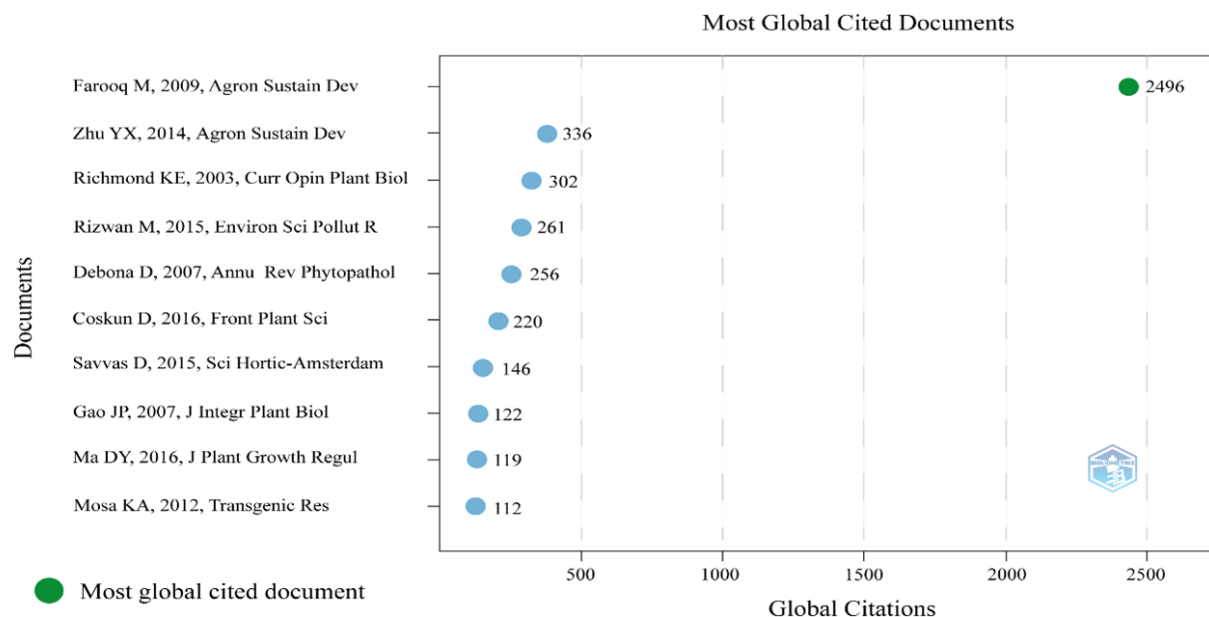
Nota. Elaboración propia



Por otra parte, se identificaron los documentos más citados en el periodo comprendido entre los años 2003 y 2023 (Fig. 2), revelando que la investigación realizada por Farooq y colaboradores en el 2009 “Plant drought stress: effects, mechanisms and management” publicada en la revista “Agronomy for Sustainable Development” es el documento más citado con alrededor de 2496 menciones, indicando su importancia e impacto en la comunidad científica que estudia los efectos del estrés hídrico en las plantas.

Figura 2.

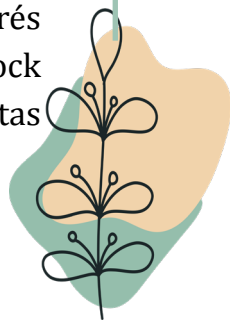
Los documentos más citados a nivel mundial entre 2003 y 2023. La investigación realizada en el 2009 por Farooq y colaboradores se posiciona como la más citada.



Nota. Elaboración propia

Análisis de co-ocurrencia de palabras clave

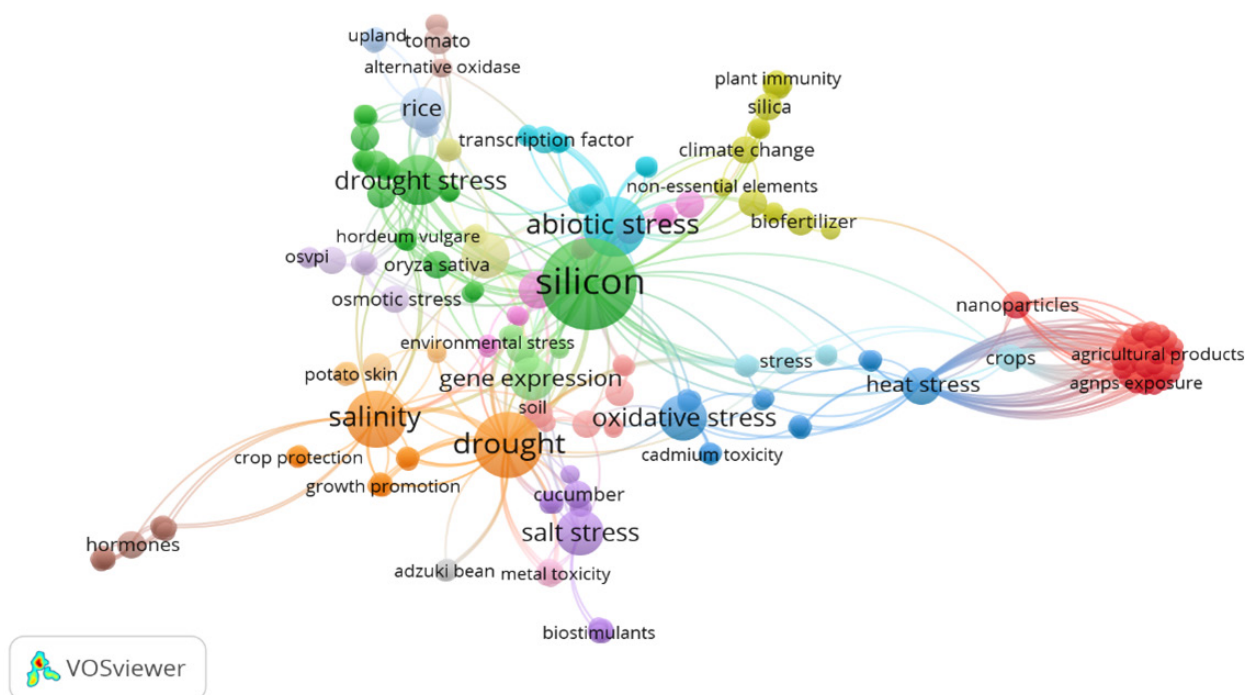
El mapa de red muestra nueve grupos de palabras clave interrelacionadas con temas agrupados dentro del campo de estudio (Fig. 3). El nodo marrón agrupa términos relacionados con “tomate”, “oxidasa alternativa” y “hormonas”, indicando un enfoque en aspectos específicos de bioquímica y biología vegetal. En el nodo azul, se encuentran términos asociados con “cultivo en secano”, “arroz”, “estrés”, “estrés oxidativo”, “toxicidad por cadmio”, “estrés térmico”, “factor de transcripción por shock térmico”, “antioxidantes” y “cultivos”, indicando la relación del estrés y las respuestas



antioxidantes en diversos cultivos bajo condiciones adversas. Por otro lado, el nodo azul claro agrupa términos como “factor de transcripción”, “fisiología”, “bioinformática” y “estrés abiótico”, sugiriendo un enfoque en la regulación genética y las herramientas bioinformáticas para estudiar la respuesta a condiciones de estrés abiótico. El nodo verde incluye términos como “estrés por sequía”, “Arabidopsis”, “acuaporinas”, “fluorescencia de clorofila”, “contenido de clorofila”, “Oryza sativa”, “Triticum sativum”, “Hordeum vulgare”, “pared celular”, “rendimiento de cultivos”, “expresión génica” y “silicio”, destacando la importancia de la investigación sobre la respuesta a la sequía y la evaluación de parámetros fisiológicos y genéticos en diferentes cultivos.

Figura 3.

Mapa de red basado en la co-ocurrencia de términos en títulos y resúmenes. Los colores indican agrupaciones de términos relacionados identificados por VOSviewer.



Nota. Elaboración propia

El nodo naranja, por su parte, agrupa términos relacionados con “fertilización con silicio”, “agronomía”, “papa”, “salinidad”, “sequía”, “crecimiento de plantas de cultivo”, “resistencia a enfermedades” y “protección”, indicando el papel del silicio (Si) en la agronomía y su impacto en la resistencia y crecimiento de las plantas. El nodo magenta se centra en “tolerancia”, “elemento beneficioso”, “planta” y “fitohormonas”,

reflejando el interés en la tolerancia a condiciones adversas y el papel de los elementos beneficiosos y fitohormonas. En el nodo amarillo, se agrupan términos como “gen de defensa”, “sílice”, “cultivos hortícolas”, “cambio climático”, “elementos no esenciales”, “agricultura sostenible”, “biofertilizante” y “nanobiofertilizante”, destacando la investigación sobre la defensa vegetal frente al cambio climático y el uso de biofertilizantes en la agricultura sostenible. El nodo púrpura incluye términos como “pepino”, “estrés salino”, “bioestimulantes”, “transcriptoma”, “transpiración”, “estrés osmótico”, “estrés por salinidad” y “apoplasto”, centrando el estudio en los efectos del estrés salino y osmótico en diversos cultivos y el papel de los bioestimulantes. En general, este estudio ofrece una visión general del estado actual de la investigación sobre mecanismos de respuesta de plantas de cultivo a estrés hídrico, destacando las áreas para una mayor investigación y las posibles vías para futuras investigaciones.

27

Análisis de centralidad

El rango de centralidad y la densidad son herramientas importantes para analizar las palabras clave de los autores (Herrera-Viedma et al., 2016). La centralidad es el grado de interacción del tema de interés con otros temas de investigación, mientras que la densidad es la fuerza interna del tema de investigación (Salleh, 2022). La Figura 4 muestra que las palabras clave de los autores se dividieron en 9 grupos principales. En el cuadrante de temas básicos, los grupos 1 (osmotic stress, abiotic stress, y root hydraulic conductance), 2 (gene family and acid biosynthesis) muestran una baja densidad y alta centralidad, indicando un desarrollo débil, pero con temas que son importantes en el campo de investigación. En el cuadrante de temas motores, encontramos que los grupos 3 (metabolism, acid, y gene), 4 (flavonoid biosynthesis, y transcription factors), 5 (drought, plants, y silicon), y 6 (drought tolerance, oxidative stress, y drought stress) tienen alta centralidad y densidad. Estos son los temas más desarrollados e importantes en el campo del silicio (Si) y la sequía.

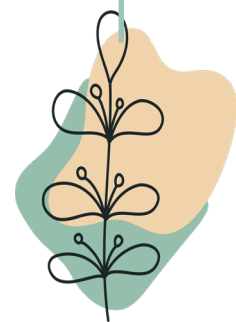
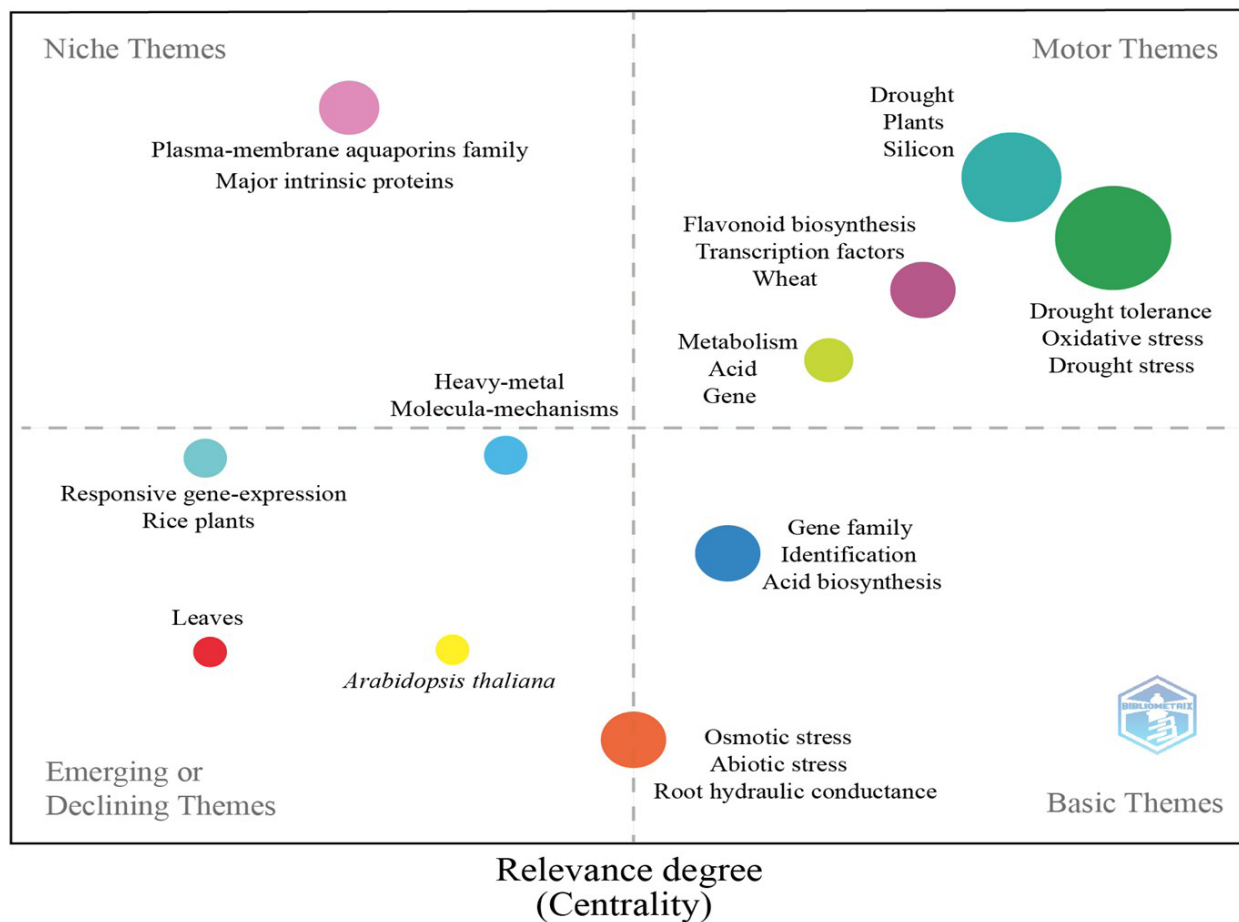


Figura 4.

Mapa temático de las palabras clave del autor por clúster. Cada burbuja representa un clúster de red, y la posición de la burbuja se establece según la centralidad y densidad.



Nota. elaboración propia

Por otro lado, el grupo 7 (plasma-membrane, aquaporins family, y major intrinsic proteins) se encuentra en el cuadrante de temas nicho; estos temas han desarrollado enlaces internos (alta densidad) pero tienen baja centralidad, es decir, una importancia limitada para el campo (Della Corte et al., 2019). Los grupos 8 (heavy metal, y molecular mechanisms) y 9 (responsive gene expresión, y rice plant) tienen una baja centralidad y densidad, indicando un desarrollo débil y marginal en el campo.

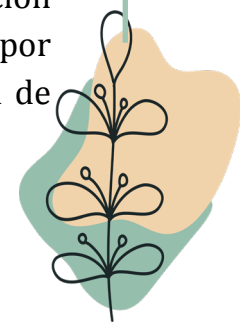
Efectos del estrés hídrico en plantas de cultivo

El estrés hídrico es una de las principales limitantes para la productividad de las plantas de cultivo a nivel mundial (Seleiman et al., 2021). Este tipo de estrés ocurre cuando la disponibilidad de agua en el suelo es insuficiente para satisfacer las demandas transpiratorias de las plantas (Ghadirnezhad Shiade et al., 2023), lo que desencadena una serie de respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares para adaptarse a las condiciones adversas (Liang et al., 2020; Tian et al., 2024; Urmi et al., 2023). El estrés hídrico no solo afecta a las plantas a nivel individual, sino que también tiene implicaciones significativas para los ecosistemas agrícolas (Rajanna et al., 2023). Las condiciones de sequía recurrente, ocasionadas por el cambio climático, modifican los patrones de disponibilidad de agua, lo que obliga a los agricultores a adaptar sus prácticas de manejo y seleccionar cultivares más resistentes (Saeed et al., 2024).

La sequía puede inhibir significativamente la fotosíntesis del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) limitando la conductancia estomática, como lo indican Liang et al (2020), esto puede influir en las características morfológicas y fisicoquímica de los frutos. Una investigación realizada por Klunklin & Savage (2017) demuestra que las condiciones de estrés hídrico modifican los compuestos bioactivos de los frutos del tomate, afectando las características de calidad. Además, Alomari-Mheidat et al (2023) reportan que el rendimiento más sensible en las plantas de tomate afectadas por la sequía se ve reflejado en el tamaño del fruto, donde no se evidencia recuperación antes de la cosecha.

En cultivos como el arroz (*Oryza sativa* L.), el déficit hídrico tiene una fuerte influencia en las características fisiológicas y el rendimiento (Bhandari et al., 2023; Salgotra & Chauhan, 2023). Los resultados del estudio de Yang et al (2019) sugieren que este tipo de condiciones de estrés aumentan significativamente el grano calcáreo y la caliza, afectando la apariencia y la calidad nutricional. Por otro lado, según Panja et al (2024) la escasez de agua reduce la fotosíntesis en el arroz, disminuyendo la acumulación de materia seca y afectando el llenado del grano. Además, la sequía retrasa la floración y provoca esterilidad en las espiguillas, lo que resulta en un bajo rendimiento de grano en la cosecha (Shah et al., 2024).

Por último, en cultivos de plantas superiores sensibles a las variaciones climáticas, como el caso del cacao (*Theobroma cacao* L.), El estrés por sequía inhibe la elongación celular en plantas debido a la disminución de la presión de turgencia, causada por la menor absorción de agua (Neither et al., 2020). Esto, junto con la reducción de



la fotoasimilación y los metabolitos necesarios para la división celular, deteriora la mitosis y provoca una disminución en el crecimiento de la planta (Fig. 5). Estos estudios sugieren la necesidad de estrategias de mitigación eficaces para proteger la producción y calidad de los cultivos bajo condiciones de estrés hídrico.

Figura 5.

Descripción de posibles mecanismos de reducción del crecimiento bajo estrés por sequía en plantas de cacao.



Nota. Elaboración propia

Mecanismos de resistencia a la sequía

Las plantas han desarrollado una variedad de mecanismos de resistencia a la sequía que les permiten sobrevivir y reproducirse en condiciones de escasez de agua (Qiao et al., 2024). Estos mecanismos incluyen adaptaciones que permiten a las plantas minimizar el daño causado por el estrés hídrico, mantener la integridad celular y continuar su crecimiento y desarrollo en condiciones adversas (Giordano et al., 2021). En la tabla 1 se presentan los principales mecanismos de resistencia al estrés hídrico en las plantas, categorizados en morfológicos, fisiológicos, bioquímicos y genéticos. Además, se incluyen ejemplos específicos de cultivos que exhiben cada tipo de adaptación.



Tabla 1.

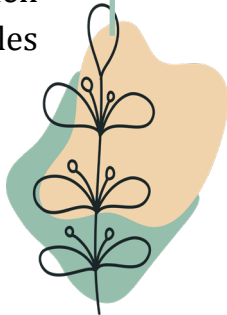
Principales mecanismos de resistencia al estrés hídrico en las plantas de cultivo.

Mecanismo	Ejemplo	Cultivo relacionado	Referencia
Morfológico	Reducción del tamaño de las hojas.	Maíz (<i>Zea mays</i>)	(Avramova et al., 2015)
	Aumento en la profundidad de las raíces.	Trigo (<i>Triticum spp.</i>)	(Grzesiak et al., 2019)
Fisiológico	Cierre de estomas para reducir la transpiración.	Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	(Polania et al., 2022)
	Reducción en la tasa de fotosíntesis.	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	(Liang et al., 2020)
	Aumento en la eficiencia del uso del agua (WUE).	Uva (<i>Vitis vinifera</i>)	(Safari et al., 2022)
Bioquímico	Aumento en la producción de antioxidantes.	Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	(Urmi et al., 2023)
	Síntesis de proteínas de choque térmico (HSPs).	Soya (<i>Glycine max</i>)	(Xu et al., 2022)
Genético	Regulación de genes en la tolerancia a la sequía.	Algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>)	(Tian et al., 2024)

Nota. Elaboración propia

Mecanismos morfológicos

Cuando las plantas experimentan estrés hídrico, su primera respuesta se manifiesta en alteraciones tanto en su morfología externa como en su estructura interna (Avramova et al., 2015). El impacto más notable de la falta de agua es la desaceleración del crecimiento, que puede llegar a causar la muerte de la planta (He et al., 2021). Estudios han demostrado que, frente a condiciones abióticas adversas, las plantas pueden adaptarse a los cambios ambientales mediante la plasticidad fenotípica (Grzesiak et al., 2019). Un ejemplo de ello es la disminución significativa de la altura en arroz (Patmi & Pitoyo, 2020), maíz (Luqman et al., 2023) y caña (Misra et al., 2020), debido principalmente al aumento de la caída de las hojas, la disminución de la expansión celular y la alteración de la mitosis en condiciones de sequía (Yang et al., 2021). Por otra parte, el estudio reportado por Sarshad et al (2021) concluye que las adaptaciones morfológicas en las plantas están estrechamente relacionadas con la capacidad para sobrevivir en ambientes áridos. Esto indica que los mecanismos morfológicos cumplen un rol importante en la adaptación de las plantas a condiciones de sequía, ya que les permiten optimizar el uso y la conservación del agua (Li et al., 2022).

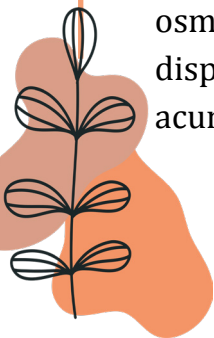


Otro de los mecanismos morfológicos de respuesta al estrés hídrico es el “escape de la sequía”, una estrategia en la que las plantas acortan su ciclo de vida o temporada de crecimiento para reproducirse antes de que el entorno se vuelva seco (Naikwade, 2023). Por ejemplo, investigaciones en especies de plantas del género *Cactaceae* han demostrado que la reducción del área foliar y el desarrollo de estructuras especializadas como espinas contribuyen significativamente a la minimización de la pérdida de agua por transpiración (Maceda et al., 2024). Por otra parte, especies como *Sorghum bicolor* mantienen un espesor de cutícula y la presencia de tricomas en la superficie de las hojas, lo que le permite una mayor resistencia a la sequía (Abreha et al., 2022; Sarshad et al., 2021). Para las plantas de cultivo, el escape de la sequía ocurre cuando el desarrollo fenológico de la planta se alinea con los períodos de disponibilidad de humedad, permitiendo que la planta evite los efectos negativos del estrés hídrico terminal (Chowdhury et al., 2021).

Mecanismos fisiológicos

Las plantas desarrollan respuestas fisiológicas que les permiten enfrentar el estrés hídrico al regular procesos clave para la supervivencia y el crecimiento. Uno de los mecanismos más estudiados es el cierre estomático, una respuesta que reduce la transpiración y minimiza la pérdida de agua en momentos críticos (Gupta et al., 2020; Oguz et al., 2022). Sin embargo, esta estrategia puede limitar la fotosíntesis, afectando el crecimiento y el rendimiento del cultivo (Liang et al., 2020). En cultivos como el frijol (*Phaseolus vulgaris*), se ha documentado que el cierre de estomas es una respuesta directa al déficit hídrico, lo que a su vez provoca una disminución en la conductancia estomática y en la tasa de fotosíntesis (Polania et al., 2022). Este mecanismo permite a las plantas conservar agua durante períodos de sequía, aunque a costa de una menor producción de biomasa.

Otro mecanismo fundamental es la mejora en la eficiencia del uso del agua (WUE), el cual permite a las plantas producir más biomasa con menos agua (Yan et al., 2023). En estudios realizados en uva (*Vitis vinifera*), se ha demostrado que el incremento en la WUE está relacionado con una mayor eficiencia en la fotosíntesis por unidad de agua utilizada (Zamorano et al., 2021). Esta adaptación es fundamental para asegurar la productividad bajo condiciones de sequía. Por otra parte, la regulación osmótica permite a las plantas mantener la turgencia celular en condiciones de baja disponibilidad de agua (Bhutto et al., 2023; Crabos et al., 2023). Este proceso implica la acumulación de solutos compatibles como prolina, azúcares solubles y glicina betaína,



que actúan como osmoprotectores (Bhandari et al., 2023; Bhardwaj et al., 2023; Cheraghi et al., 2024). Estas moléculas no solo mantienen el equilibrio osmótico, sino que también estabilizan proteínas y estructuras celulares, protegiendo a las plantas de daños adicionales causados por la sequía. En cultivos como el arroz (*Oryza sativa*), la acumulación de estos compuestos ayuda a las plantas a retener agua, protegiendo las estructuras celulares durante el estrés (Patmi & Pitoyo, 2020).

Mecanismos bioquímicos y genéticos

Las plantas, al enfrentar condiciones de estrés hídrico, activan una serie de mecanismos bioquímicos y moleculares que les permiten adaptarse y sobrevivir en ambientes áridos (Rakkammal et al., 2023). la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) bajo estrés hídrico desencadena respuestas antioxidantes, donde enzimas como la superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y peroxidasa (POD) desempeñan un papel fundamental al neutralizar el exceso de ROS y prevenir el daño oxidativo a las células (Bhandari et al., 2023; Oguz et al., 2022; Sarshad et al., 2021). En cultivos como el arroz se ha demostrado que el daño oxidativo de las plantas puede ser aliviado por la acumulación de osmolitos, esto gracias a un efecto combinado ocasionado por las aplicaciones de ácido salicílico y prolina (Urmi et al., 2023). Por otra parte, la síntesis de proteínas también permite que las plantas respondan de manera rápida y eficaz a los cambios ambientales, garantizando la supervivencia en condiciones extremas (Guo et al., 2023). Las proteínas de choque térmico (HSP) actúan como chaperonas moleculares, estabilizando y asistiendo en el correcto plegamiento de otras proteínas que pueden desnaturalizarse bajo condiciones de sequía (Rahman et al., 2022). Por ejemplo, se ha observado que en la soya (*Glycine max*), la síntesis de HSP se incrementa en condiciones de estrés hídrico (Xu et al., 2022).

A nivel genético, las plantas responden al estrés hídrico mediante la regulación de genes específicos que controlan procesos clave para la tolerancia a la sequía (Guizani et al., 2024; Naikwade et al., 2023). Entre estos se encuentran los genes que codifican para proteínas LEA (Late Embryogenesis Abundant), que protegen las membranas y las proteínas durante la deshidratación (Jia et al., 2022). En un estudio realizado por Magwanga et al (2018) identificaron un total de 242, 136 y 142 genes LEA en tres especies de algodón americano (*Gossypium hirsutum*, *Gossypium arboreum* y *Gossypium raimondii*, respectivamente). Estos genes mostraron una alta expresión en tejidos sometidos a condiciones de sequía, lo que sugiere su participación directa en la adaptación al estrés hídrico. Además, estas proteínas son capaces de prevenir la



agregación de proteínas desnaturalizadas y mantener la estabilidad celular durante episodios de deshidratación, lo que resalta su papel fundamental en la respuesta genética a la sequía.

Por otra parte, la señalización mediada por el ácido abscísico (ABA) juega un papel central en la respuesta al estrés hídrico (Fiallos-Salguero et al., 2023). El ABA induce el cierre estomático y regula la expresión de genes involucrados en la biosíntesis de osmoprotectores y antioxidantes, promoviendo la capacidad de las plantas para conservar agua y reducir el daño celular (Ilyas et al., 2021). Estudios recientes han identificado también el papel de factores de transcripción como los de las familias MYB, NAC y DREB, que regulan la expresión de genes asociados con la adaptación a la sequía (Khatun et al., 2021).

Finalmente, las plantas también recurren a mecanismos genéticos avanzados, como el uso de tecnologías biotecnológicas y de edición genética para mejorar su tolerancia al estrés hídrico (Li et al., 2022). La tecnología CRISPR/Cas9 ha permitido identificar y modificar genes que controlan la eficiencia del uso del agua y la resistencia a la sequía, lo que ofrece un gran potencial para desarrollar variedades de cultivos más resistentes (Yang et al., 2021). La selección asistida por marcadores y la genómica funcional también está facilitando la identificación de loci de caracteres cuantitativos (QTL) que contribuyen a la resistencia a la sequía en diferentes especies de cultivos, lo que abre nuevas vías para mejorar la productividad en ambientes con recursos hídricos limitados (Ilyas et al., 2021).

Silicio (Si) como regulador del estrés hídrico

El silicio (Si) es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, aunque su disponibilidad para las plantas varía considerablemente (Kovács et al., 2022). A pesar de no ser considerado un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, su papel beneficioso en la mejora de la tolerancia al estrés, especialmente el estrés hídrico (Fig. 6), ha sido ampliamente documentado (Bhardwaj & Kapoor, 2021; Wang et al., 2021). El silicio (Si) se acumula en los tejidos de las plantas principalmente en forma de ácido monosilícico (H_4SiO_4) y se deposita como sílice amorfa, formando fitolitos que ayudan a las plantas a soportar condiciones de estrés (Shivaraj et al., 2022; Sourì et al., 2021).

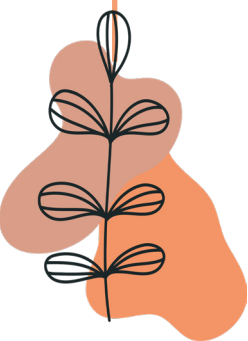
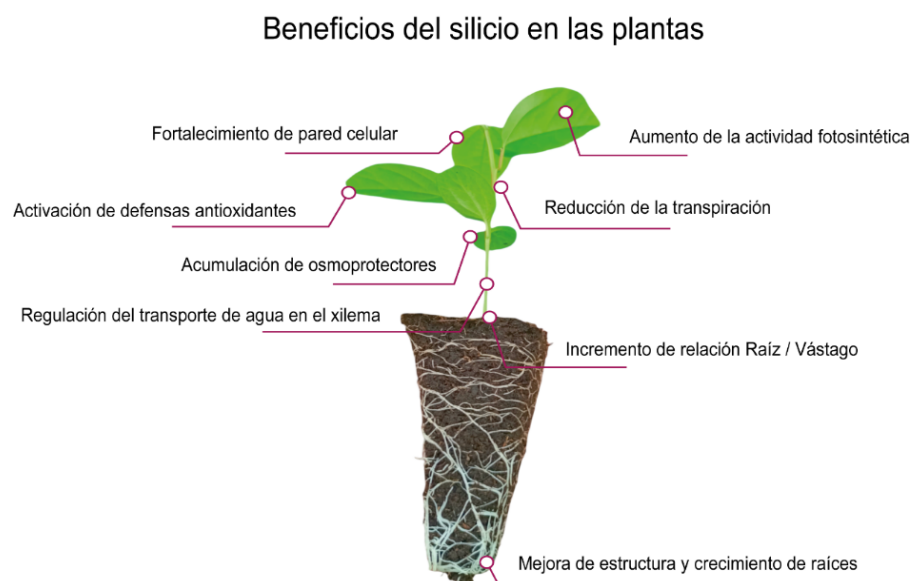


Figura 6.

Principales beneficios del silicio (Si) en las plantas bajo condiciones de estrés hídrico.



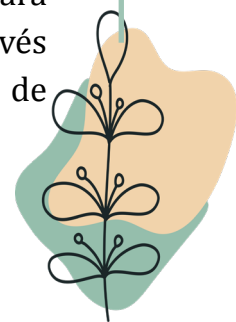
Nota. Elaboración propia

Mecanismos de absorción y transporte de silicio (Si)

Las plantas absorben silicio (Si) en forma de ácido monosilícico a través de transportadores específicos localizados en las membranas celulares de las raíces (Moraes et al., 2024). Los principales transportadores involucrados en este proceso son Lsi1 (transportador de entrada) y Lsi2 (transportador de salida), que facilitan el movimiento del silicio (Si) desde el suelo hacia el xilema y, posteriormente, hacia los tejidos aéreos (Rajora et al., 2023; Wang et al., 2024). El silicio (Si) se puede acumular en diversas estructuras celulares, como las paredes celulares y la cutícula, lo que mejora la resistencia física de las plantas y ayuda a regular la pérdida de agua (Bhardwaj et al., 2023).

Efectos del silicio bajo condiciones de sequía

El silicio actúa mitigando los efectos del estrés hídrico a través de múltiples mecanismos fisiológicos y bioquímicos. En primer lugar, mejora la capacidad de las plantas para retener agua al aumentar la eficiencia en la absorción y transporte de agua a través de las raíces, incrementando la relación raíz/vástago y modificando la anatomía de



las raíces (Bhardwaj et al., 2023; Wang et al., 2021). También regula la apertura y cierre de los estomas, reduciendo la transpiración y minimizando la pérdida de agua (Bukhari et al., 2021).

Además, el silicio (Si) favorece la acumulación de osmoprotectores como prolina y compuestos fenólicos, que ayudan a las células vegetales a mantener la homeostasis osmótica bajo estrés (Bhardwaj et al., 2023). A nivel bioquímico, el silicio activa sistemas antioxidantes en las plantas, como las enzimas catalasa, superóxido dismutasa y peroxidasa, lo que reduce la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y protege las células de los daños oxidativos inducidos por el estrés hídrico (Bukhari et al., 2021; Wang et al., 2021).

Impacto en la fotosíntesis y el crecimiento

El silicio (Si) también mejora la fotosíntesis al mantener la integridad de los pigmentos fotosintéticos, como la clorofila, bajo condiciones de sequía (Xu et al., 2022). La suplementación con silicio (Si) ayuda a las plantas a mantener mayores tasas de fotosíntesis y eficiencia en el uso del agua, lo que se traduce en un crecimiento sostenido incluso bajo condiciones de déficit hídrico (Khan et al., 2024). Esto resulta en una mejora general en la producción de biomasa y rendimiento de los cultivos (Ghouri et al., 2022; Malik et al., 2021).

Regulación genética y molecular

A nivel molecular, el silicio (Si) ha demostrado inducir la expresión de genes relacionados con la respuesta al estrés hídrico (López-Pérez et al., 2024). Estos genes están involucrados en procesos clave como la síntesis de osmoprotectores, la regulación del balance hídrico y la activación de señales hormonales como el ácido abscísico (ABA) y el ácido jasmónico (JA), cruciales en la adaptación de las plantas a la sequía (Malik et al., 2021). Además, el silicio (Si) interactúa con otras vías de señalización que mejora la resiliencia al estrés, contribuyendo a la estabilidad del metabolismo celular durante el déficit hídrico (Bhardwaj et al., 2023).

Conclusiones y futuras perspectivas

El silicio (Si) cumple un rol fundamental en la mitigación del estrés hídrico en las plantas de cultivo, ayudando a mejorar la regulación estomática, la protección antioxidante y la absorción de agua. Estos mecanismos permiten a las plantas mantener su eficiencia



fotosintética y crecimiento incluso en condiciones de sequía, lo que contribuye a mejorar el rendimiento agrícola. A pesar de estos avances, aún se requiere una mayor comprensión de los mecanismos moleculares específicos mediante los cuales el silicio (Si) regula respuestas al estrés hídrico, especialmente en plantas no acumuladoras de silicio (Si).

Las investigaciones se deben enfocar en la mejora de las estrategias de fertilización con silicio (Si), explorando su interacción con otros nutrientes y hormonas, y en el desarrollo de aplicaciones más sostenibles para la agricultura. El uso del silicio (Si) podría ser la clave para reducir el consumo de agua y fertilizantes químicos, lo que favorecería la sostenibilidad de la producción agrícola. Sin embargo, es necesario estudiar más a fondo los impactos a largo plazo del uso de silicio (Si) en los suelos y ecosistemas agrícolas para maximizar sus beneficios sin comprometer el equilibrio ecológico.

Contribución de autores

CCC y **NFV** conceptualizaron la idea, recolectaron la literatura y analizaron los datos. **CCC**, **YBR** y **NFV** participaron en la redacción. Además, **CCC**, **YDMO** y **NFV** revisaron y editaron la versión final. Todos los autores han leído y aprobado la versión final del manuscrito.

Agradecimientos

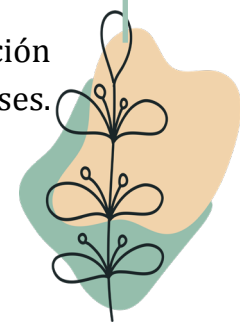
Los autores agradecen al Centro de Formación Agroindustrial La Angostura por permitir el desarrollo de la investigación en sus instalaciones.

Financiación

El presente estudio se deriva del proyecto de investigación “Implementación de silicio (SI) como estrategia de mitigación para disminuir la vulnerabilidad del cacao al cambio climático en el Huila” con ID SGPS-11161-2023 financiado por el Sistema de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico del SENA (SENNOVA).

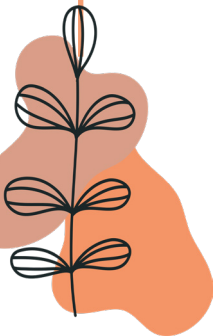
Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un posible conflicto de intereses.



Declaración de uso de IA en el proceso de escritura

Durante la preparación de este trabajo, los autores utilizaron OpenAI (ChatGPT-4) para la corrección lingüística del manuscrito. Tras utilizar esta herramienta/servicio, los autores revisaron y editaron el manuscrito según fuera necesario y asumen la responsabilidad del contenido de la publicación.

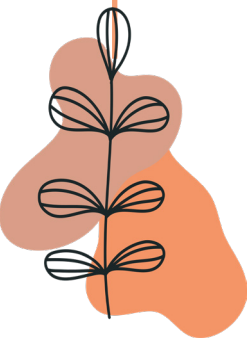


Referencias bibliográficas

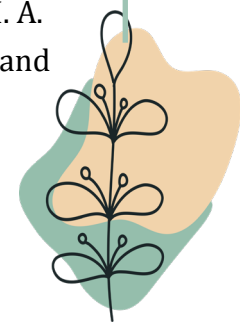
- Abreha, K. B., Enyew, M., Carlsson, A. S., Vetukuri, R. R., Feyissa, T., Motlhaodi, T.,... & Geleta, M. (2022). Sorghum in dryland: morphological, physiological, and molecular responses of sorghum under drought stress. *Planta*, 255, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03799-7>
- Ahsan, M., Valipour, M., Nawaz, F., Raheel, M., Abbas, H. T., Sajid, M.,... & Zulfiqar, H. (2023). Evaluation of silicon supplementation for drought stress under water-deficit conditions: an application of sustainable agriculture. *Agronomy*, 13(2), 599. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020599>
- Alomari-Mheidat, M., Corell, M., Castro-Valdecantos, P., Andreu, L., Moriana, A., & Martín-Palomo, M. J. (2023). Effect of water stress and rehydration on the cluster and fruit quality of greenhouse tomatoes. *Agronomy*, 13(2), 563. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020563>
- Avramova, V., AbdElgawad, H., Zhang, Z., Fotschki, B., Casadevall, R., Vergauwen, L.,... & Beemster, G. T. (2015). Drought induces distinct growth response, protection, and recovery mechanisms in the maize leaf growth zone. *Plant physiology*, 169(2), 1382-1396. <https://doi.org/10.1104/pp.15.00276>
- Ayyaz, A., Zhou, Y., Batool, I., Hannan, F., Huang, Q., Zhang, K.,... & Zhou, W. (2024). Calcium nanoparticles and abscisic acid improve drought tolerance, mineral nutrients uptake and inhibitor-mediated photosystem II performance in *Brassica napus*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(2), 516-537. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-11108-7>
- Barão, L. (2023). The use of si-based fertilization to improve agricultural performance. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(1), 1096-1108. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-01106-1>
- Bhandari, U., Gajurel, A., Khadka, B., Thapa, I., Chand, I., Bhatta, D.,... & Shrestha, J. (2023). Morpho-physiological and biochemical response of rice (*Oryza sativa* L.) to drought stress: A review. *Heliyon*, 9(3). [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)00951-9](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)00951-9)
- Bhardwaj, S., & Kapoor, D. (2021). Fascinating regulatory mechanism of silicon for alleviating drought stress in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 1044-1053. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.07.005>



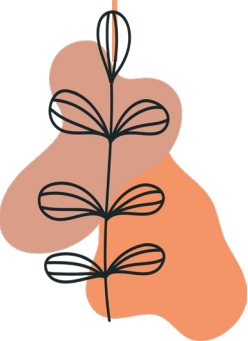
- Bhardwaj, S., Sharma, D., Singh, S., Ramamurthy, P. C., Verma, T., Pujari, M.,... & Prasad, R. (2023). Physiological and molecular insights into the role of silicon in improving plant performance under abiotic stresses. *Plant and Soil*, 486(1), 25-43. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05395-4>
- Bhutto, LA, Osborne, CP y Quick, WP (2023). Ajuste osmótico y cambios metabólicos en condiciones de estrés por sequía en genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.). *Pakistan Journal of Botany*, 55, 915-923.
- Biju, S., Fuentes, S., & Gupta, D. (2023). Novel insights into the mechanism (s) of silicon-induced drought stress tolerance in lentil plants revealed by RNA sequencing analysis. *BMC Plant Biology*, 23(1), 498. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04492-5>
- Bukhari, M. A., Ahmad, Z., Ashraf, M. Y., Afzal, M., Nawaz, F., Nafees, M.,... & Manan, A. (2021). Silicon mitigates drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through improving photosynthetic pigments, biochemical and yield characters. *Silicon*, 13, 4757-4772. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00797-4>
- Cheraghi, M., Motesarezadeh, B., Mousavi, S. M., Basirat, M., Alikhani, H. A., & Zarebanadkouki, M. (2024). Application of silicon improves rhizosheath formation, morpho-physiological and biochemical responses of wheat under drought stress. *Plant and Soil*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06584-z>
- Chowdhury, MK, Hasan, MA, Bahadur, MM, Islam, MR, Hakim, MA, Iqbal, MA,... & Islam, MS (2021). Evaluación de la tolerancia a la sequía de algunos genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) a través de la fenología, el crecimiento y los índices fisiológicos. *Agronomía*, 11 (9), 1792.
- Costa, M. G., de Mello Prado, R., Palaretti, L. F., & de Souza Júnior, J. P. (2024). The effect of abiotic stresses on plant C: N: P homeostasis and their mitigation by silicon. *The Crop Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.11.012>
- Crabos, A., Huang, Y., Boursat, T., Maurel, C., Ruffel, S., Krouk, G., y Boursiac, Y. (2023). Regulaciones transcripcionales tempranas diferenciadas por turgencia y potencial osmótico en las raíces de *Arabidopsis*. *Journal of Experimental Botany*, 74 (18), 5917-5930.
- Della Corte, V., Del Gaudio, G., Sepe, F., & Sciarelli, F. (2019). Sustainable tourism in the open innovation realm: A bibliometric analysis. *Sustainability*, 11(21), 6114. <https://doi.org/10.3390/su11216114>



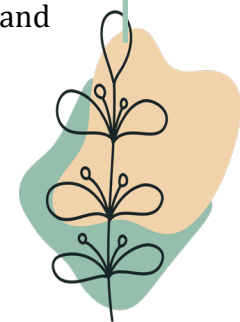
- Fiallos-Salguero, M. S., Li, J., Li, Y., Xu, J., Fang, P., Wang, Y.,... & Tao, A. (2023). Identification of AREB/ABF gene family Involved in the response of ABA under salt and drought stresses in Jute (*Corchorus olitorius* L.). *Plants*, 12(5), 1161. <https://doi.org/10.3390/plants12051161>
- Ghadirnezhad Shiade, S. R., Fathi, A., Taghavi Ghasemkheili, F., Amiri, E., & Pessarakli, M. (2023). Plants' responses under drought stress conditions: Effects of strategic management approaches—A review. *Journal of plant Nutrition*, 46(9), 2198-2230. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2105720>
- Ghoury, F., Ali, Z., Naeem, M., Ul-Allah, S., Babar, M., Baloch, F. S.,... & Shahid, M. Q. (2022). Effects of silicon and selenium in alleviation of drought stress in rice. *Silicon*, 14(10), 5453-5461. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01277-z>
- Gill, S., Ramzan, M., Naz, G., Ali, L., Danish, S., Ansari, MJ y Salmen, SH (2024). Efecto del biocarbón basado en nanopartículas de silicio en el crecimiento del trigo, los antioxidantes y la concentración de nutrientes bajo estrés salino. *Scientific Reports*, 14 (1), 6380. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55924-7>
- Giordano, M., Petropoulos, S. A., & Roupheal, Y. (2021). Response and defence mechanisms of vegetable crops against drought, heat and salinity stress. *Agriculture*, 11(5), 463. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050463>
- Grzesiak, M. T., Hordyńska, N., Maksymowicz, A., Grzesiak, S., & Szechyńska-Hebda, M. (2019). Variation among spring wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes in response to the drought stress. II—Root system structure. *Plants*, 8(12), 584. <https://doi.org/10.3390/plants8120584>
- Guizani, A., Babay, E., Askri, H., Sialer, M. F., & Gharbi, F. (2024). Screening for drought tolerance and genetic diversity of wheat varieties using agronomic and molecular markers. *Molecular Biology Reports*, 51(1), 432.
- Guo, Y., Qu, Y., Fan, R., Sun, F., Chen, Q., Shi, J.,... & Yan, G. (2023). Regulating drought tolerance in cotton by the expression of a specific allele of heat shock protein 70. *Industrial Crops and Products*, 202, 116820. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116820>
- Gupta, A., Rico-Medina, A., & Caño-Delgado, A. I. (2020). The physiology of plant responses to drought. *Science*, 368(6488), 266-269. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.aaz7614>
- Hassan, K. M., Ajaj, R., Abdelhamid, A. N., Ebrahim, M., Hassan, I. F., Hassan, F. A.,... & Ali, M. A. (2024). Silicon: A Powerful Aid for Medicinal and Aromatic Plants against Abiotic and Biotic Stresses for Sustainable Agriculture. *Horticulturae*, 10(8), 806.



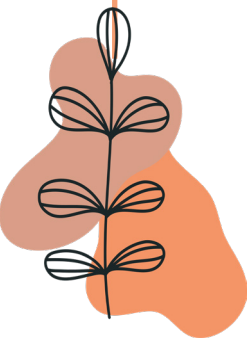
- He, X., Xu, L., Pan, C., Gong, C., Wang, Y., Liu, X., & Yu, Y. (2020). Drought resistance of *Camellia oleifera* under drought stress: Changes in physiology and growth characteristics. *PLoS One*, 15(7), e0235795. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.11.012>
- Herrera-Viedma, E., Martínez, M. A., & Herrera, M. (2016). Bibliometric tools for discovering information in database. In *Trends in Applied Knowledge-Based Systems and Data Science: 29th International Conference on Industrial Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems, IEA/AIE 2016, Morioka, Japan, August 2-4, 2016, Proceedings 29* (pp. 193-203). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42007-3_17
- Ilyas, M., Nisar, M., Khan, N., Hazrat, A., Khan, A. H., Hayat, K.,... & Ullah, A. (2021). Drought tolerance strategies in plants: a mechanistic approach. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 926-944. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10174-5>
- Jia, C., Guo, B., Wang, B., Li, X., Yang, T., Li, N.,... & Yu, Q. (2022). The LEA gene family in tomato and its wild relatives: genome-wide identification, structural characterization, expression profiling, and role of SILEA6 in drought stress. *BMC Plant Biology*, 22(1), 596. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03953-7>
- Johnson, S. N., Chen, Z. H., Rowe, R. C., & Tissue, D. T. (2022). Field application of silicon alleviates drought stress and improves water use efficiency in wheat. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1030620. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1030620>
- Khan, I., Awan, S. A., Rizwan, M., Khan, A., Brestic, M., Wang, H.,... & Xie, W. (2024). Silicon-induced modulation of photosynthetic pigments, osmolytes, and phytohormonal regulation boosted the drought tolerance in *Elymus sibiricus* L. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(4), 998-1011. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-11155-0>
- Khatun, M., Sarkar, S., Era, F. M., Islam, A. M., Anwar, M. P., Fahad, S.,... & Islam, A. A. (2021). Drought stress in grain legumes: Effects, tolerance mechanisms and management. *Agronomy*, 11(12), 2374. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122374>
- Klunklin, W., & Savage, G. (2017). Effect on quality characteristics of tomatoes grown under well-watered and drought stress conditions. *Foods*, 6(8), 56. <https://doi.org/10.3390/foods6080056>
- Kovács, S., Kutasy, E., & Csajbók, J. (2022). The multiple role of silicon nutrition in alleviating environmental stresses in sustainable crop production. *Plants*, 11(9), 1223. <https://doi.org/10.3390/plants11091223>



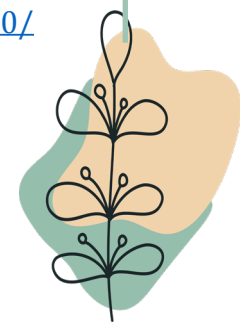
- Li, C., Han, H., Ablimiti, M., Liu, R., Zhang, H., & Fan, J. (2022). Morphological and physiological responses of desert plants to drought stress in a man-made landscape of the Taklimakan desert shelter belt. *Ecological Indicators*, 140, 109037. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109037>
- Liang, G., Liu, J., Zhang, J., & Guo, J. (2020). Effects of drought stress on photosynthetic and physiological parameters of tomato. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 145(1), 12-17. <https://doi.org/10.21273/JASHS04725-19>
- Liu, Y., Wang, M., Yu, N., Zhao, W., Wang, P., Zhang, H.,... & Lu, H. (2024). Trends and insights in dengue virus research globally: a bibliometric analysis (1995–2023). *Journal of Translational Medicine*, 22(1), 818. <https://doi.org/10.1186/s12967-024-05561-5>
- López-Pérez, M. C., Pérez-Labrada, F., González-García, Y., & Juárez-Maldonado, A. (2024). Silicon induced positive response at biochemical and gene expression level in tomato plants inoculated with *Fusarium oxysporum*. *Polibotánica*, (57), 213-236. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.57.13>
- Luqman, M., Shahbaz, M., Maqsood, M. F., Farhat, F., Zulfiqar, U., Siddiqui, M. H.,... & Haider, F. U. (2023). Effect of strigolactone on growth, photosynthetic efficiency, antioxidant activity, and osmolytes accumulation in different maize (*Zea mays* L.) hybrids grown under drought stress. *Plant Signaling & Behavior*, 18(1), 2262795. <https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2262795>
- Maceda, A., Trejo, C., & Terrazas, T. (2024). Water flow in two Cactaceae species: standardization of the method and test under different drought conditions. *Brazilian Journal of Botany*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s40415-024-01008-9>
- Magwanga, R. O., Lu, P., Kirungu, J. N., Lu, H., Wang, X., Cai, X.,... & Liu, F. (2018). Characterization of the late embryogenesis abundant (LEA) proteins family and their role in drought stress tolerance in upland cotton. *BMC genetics*, 19, 1-31. <https://doi.org/10.1186/s12863-017-0596-1>
- Malik, M. A., Wani, A. H., Mir, S. H., Rehman, I. U., Tahir, I., Ahmad, P., & Rashid, I. (2021). Elucidating the role of silicon in drought stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 165, 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.021>
- Mehta, S., Gogna, M., Singh, B., Patra, A., Singh, I. K., & Singh, A. (2020). Silicon: a plant nutritional “non-entity” for mitigating abiotic stresses. *Plant Stress Biology: Strategies and Trends*, 17-49. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9380-2_2



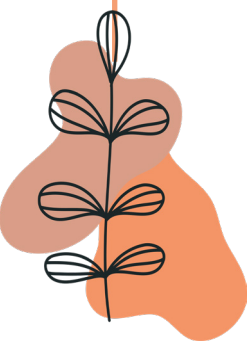
- Mir, R. A., Bhat, B. A., Yousuf, H., Islam, S. T., Raza, A., Rizvi, M. A.,... & Zargar, S. M. (2022). Multidimensional role of silicon to activate resilient plant growth and to mitigate abiotic stress. *Frontiers in plant science*, 13, 819658. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.819658>
- Misra, V., Solomon, S., Mall, A. K., Prajapati, C. P., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., & Ansari, M. I. (2020). Morphological assessment of water stressed sugarcane: A comparison of waterlogged and drought affected crop. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(5), 1228-1236. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.02.007>
- Moraes, S. P. D. O., Menezes, B. S. D., Araújo, F. S., Escobar, M. E. O., & Oliveira, T. S. D. (2024). Silicon absorption by plants in response to the environment. *Revista Ceres*, 71, e71026. <https://doi.org/10.1590/0034-737X2024710026>
- Naikwade, P. V. (2023). Plant responses to drought stress: Morphological, physiological, molecular approaches, and drought resistance. In *Plant Metabolites under Environmental Stress* (pp. 149-183). Apple Academic Press.
- Niether, W., Glawe, A., Pfohl, K., Adamtey, N., Schneider, M., Karlovsky, P. y Pawelzik, E. (2020). El efecto del estrés hídrico del suelo a corto y largo plazo en la respuesta fisiológica de tres cultivares de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Plant Growth Regulation*, 92, 295-306.
- Oguz, M. C., Aycan, M., Oguz, E., Poyraz, I., & Yildiz, M. (2022). Drought stress tolerance in plants: Interplay of molecular, biochemical and physiological responses in important development stages. *Physiologia*, 2(4), 180-197. <https://doi.org/10.3390/physiologia2040015>
- Panja, S., Gupta, A. D., & Dey, N. (2024). Impact of Drought Stress on Grains Filling in Rice and its Management: A Review. *Agricultural Reviews*, 45(2). 10.18805/ag.R-2369
- Park, H. Y., Suh, C. H., Woo, S., Kim, P. H., & Kim, K. W. (2022). Quality reporting of systematic review and meta-analysis according to PRISMA 2020 guidelines: results from recently published papers in the Korean Journal of Radiology. *Korean journal of radiology*, 23(3), 355. 10.3348/kjr.2021.0808
- Patmi, Y. S., & Pitoyo, A. (2020). Effect of drought stress on morphological, anatomical, and physiological characteristics of Cempo Ireng cultivar mutant rice (*Oryza sativa* L.) strain 51 irradiated by gamma-ray. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1436, No. 1, p. 012015). IOP Publishing. 10.1088/1742-6596/1436/1/012015



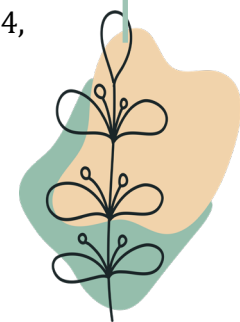
- Polania, J. A., Salazar-Chavarría, V., Gonzalez-Lemes, I., Acosta-Maspons, A., Chater, C. C., & Covarrubias, A. A. (2022). Contrasting Phaseolus crop water use patterns and stomatal dynamics in response to terminal drought. *Frontiers in Plant Science*, 13, 894657. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.894657>
- Qiao, M., Hong, C., Jiao, Y., Hou, S., & Gao, H. (2024). Impacts of drought on photosynthesis in major food crops and the related mechanisms of plant responses to drought. *Plants*, 13(13), 1808. <https://doi.org/10.3390/plants13131808>
- Rahman, M. A., Woo, J. H., Song, Y., Lee, S. H., Hasan, M. M., Azad, M. A. K., & Lee, K. W. (2022). Heat shock proteins and antioxidant genes involved in heat combined with drought stress responses in perennial rye grass. *Life*, 12(9), 1426. <https://doi.org/10.3390/life12091426>
- Rajanna, G. A., Suman, A., & Venkatesh, P. (2023). Mitigating Drought Stress Effects in Arid and Semi-Arid Agro-Ecosystems through Bioirrigation Strategies—A Review. *Sustainability*, 15(4), 3542. <https://doi.org/10.3390/su15043542>
- Rajora, N., Thakral, V., Geetika, Vats, S., Padalkar, G., Sudhakaran, S.,... & Deshmukh, R. (2023). Understanding aquaporins regulation and silicon uptake in carrot (*Daucus carota*). *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 32(1), 51-62. <https://doi.org/10.1007/s13562-022-00780-7>
- Rakkammal, K., Maharajan, T., Shriram, R. N., Ram, P. J., Ceasar, S. A., & Ramesh, M. (2023). Physiological, biochemical and molecular responses of finger millet (*Eleusine coracana*) genotypes exposed to short-term drought stress induced by PEG-6000. *South African Journal of Botany*, 155, 45-59. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.01.053>
- Saeed, A., Ahmed, H. G. M. D., Zeng, Y., Fatima, N., Hussain, G. S., Akram, M. I.,... & Mushtaq, M. A. (2024). Genetic evaluation and breeding strategies under water deficit environment to develop the drought tolerant wheat germplasm. *Polish J Environ Stud*, 33, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/188056>
- Saha, G., Mostofa, M. G., Rahman, M. M., & Tran, L. S. P. (2021). Silicon-mediated heat tolerance in higher plants: A mechanistic outlook. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 341-347. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.05.051>
- Salgotra, R. K., & Chauhan, B. S. (2023). Ecophysiological responses of rice (*Oryza sativa* L.) to drought and high temperature. *Agronomy*, 13(7), 1877. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071877>



- Salleh, S. Z. (2022). Bibliometric and content analysis on publications in digitization technology implementation in cultural heritage for recent five years (2016–2021). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 25, e00225. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2022.e00225>
- Salleh, S. Z. (2022). Bibliometric and content analysis on publications in digitization technology implementation in cultural heritage for recent five years (2016–2021). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 25, e00225.
- Sarshad, A., Talei, D., Torabi, M., Rafiei, F., & Nejatkah, P. (2021). Morphological and biochemical responses of *Sorghum bicolor* (L.) Moench under drought stress. *SN Applied Sciences*, 3(1), 81. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03977-4>
- Sato, H., Mizoi, J., Shinozaki, K., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2024). Complex plant responses to drought and heat stress under climate change. *The Plant Journal*, 117(6), 1873-1892.
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y.,... & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
- Shah, B., Yadav, S. P. S., Shrestha, M., Khadka, A., Dahal, K., Neupane, B., & Bhandari, S. (2024). Drought tolerance in rice (*Oryza sativa* L.): Impact, performance and recent trends. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 38(1), 169-181. <https://dergipark.org.tr/en/pub/selcukjafsci/issue/84294/1318632>
- Shivaraj, S. M., Mandlik, R., Bhat, J. A., Raturi, G., Elbaum, R., Alexander, L.,... & Sonah, H. (2022). Outstanding questions on the beneficial role of silicon in crop plants. *Plant and Cell Physiology*, 63(1), 4-18. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcab145>
- Souri, Z., Khanna, K., Karimi, N., & Ahmad, P. (2021). Silicon and plants: current knowledge and future prospects. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 906-925. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10172-7>
- Stadnik, B., Tobiasz-Salach, R., & Mazurek, M. (2022). Effect of Silicon on Oat Salinity Tolerance: analysis of the epigenetic and physiological response of plants. *Agriculture*, 13(1), 81. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010081>
- Tayade, R., Ghimire, A., Khan, W., Lay, L., Attipoe, J. Q., & Kim, Y. (2022). Silicon as a smart fertilizer for sustainability and crop improvement. *Biomolecules*, 12(8), 1027. <https://doi.org/10.3390/biom12081027>



- Teimoori, N., Ghobadi, M., & Kahrizi, D. (2023). Improving the growth characteristics and grain production of *Camelina* (*Camelina sativa* L.) under salinity stress by silicon foliar application. *Agrotechniques in Industrial Crops*, 3(1), 1-13. https://atic.razi.ac.ir/article_2620.html
- Thakral, V., Sudhakaran, S., Jadhav, H., Mahakalkar, B., Sehra, A., Dhar, H.,... & Deshmukh, R. (2024). Unveiling silicon-mediated cadmium tolerance mechanisms in mungbean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek): Integrative insights from gene expression, antioxidant responses, and metabolomics. *Journal of Hazardous Materials*, 474, 134671. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134671>
- Tian, Z., Li, K., Sun, Y., Chen, B., Pan, Z., Wang, Z.,... & Du, X. (2024). Physiological and transcriptional analyses reveal formation of memory under recurring drought stresses in seedlings of cotton (*Gossypium hirsutum*). *Plant Science*, 338, 111920. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111920>
- Urmi, T. A., Islam, M. M., Zumur, K. N., Abedin, M. A., Haque, M. M., Siddiqui, M. H.,... & Hoque, M. A. (2023). Combined effect of salicylic acid and proline mitigates drought stress in rice (*Oryza sativa* L.) through the modulation of physiological attributes and antioxidant enzymes. *Antioxidants*, 12(7), 1438. <https://doi.org/10.3390/antiox12071438>
- Wang, H., Teng, L., Mao, X., He, T., & Fu, T. (2024). Comparing the Effects of Lime Soil and Yellow Soil on Cadmium Accumulation in Rice during Grain-Filling and Maturation Periods. *Plants*, 13(15), 2018. <https://doi.org/10.3390/plants13152018>
- Wang, M., Wang, R., Mur, L. A. J., Ruan, J., Shen, Q., & Guo, S. (2021). Functions of silicon in plant drought stress responses. *Horticulture Research*, 8. <https://doi.org/10.1038/s41438-021-00681-1>
- Xu, J., Guo, L., & Liu, L. (2022). Exogenous silicon alleviates drought stress in maize by improving growth, photosynthetic and antioxidant metabolism. *Environmental and Experimental Botany*, 201, 104974. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104974>
- Xu, K., Zhao, Y., Zhao, Y., Feng, C., Zhang, Y., Wang, F.,... & Li, H. (2022). Soybean F-box-like protein GmFBL144 interacts with small heat shock protein and negatively regulates plant drought stress tolerance. *Frontiers in plant science*, 13, 823529. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.823529>
- Yan, S., Weng, B., Jing, L., & Bi, W. (2023). Effects of drought stress on water content and biomass distribution in summer maize (*Zea mays* L.). *Frontiers in Plant Science*, 14, 1118131.



- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. (2021). Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7(3), 50. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>
- Yang, X., Wang, B., Chen, L., Li, P., & Cao, C. (2019). The different influences of drought stress at the flowering stage on rice physiological traits, grain yield, and quality. *Scientific reports*, 9(1), 3742. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40161-0>
- Zamorano, D., Franck, N., Pastenes, C., Wallberg, B., Garrido, M., & Silva, H. (2021). Improved physiological performance in grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. Cabernet Sauvignon facing recurrent drought stress. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 27(3), 258-268. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12482>



Microorganismos asociados en la fermentación y calidad de cacao

Microorganisms associated with the fermentation and quality of cocoa

Adrián Rico^{1*}, Karen Lozano¹, Kevin Trujillo¹,
Claudia Ordoñez¹, Kathryn Guzmán¹

¹. Centro de Formación Agroindustrial, SENA – Servicio Nacional de Aprendizaje,
adrico@sena.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-6491-6929>.

¹. Centro de Formación Agroindustrial, SENA – Servicio Nacional de Aprendizaje,
klozanor@sena.edu.co, <https://orcid.org/0009-0001-8953-4361>

¹. Centro de Formación Agroindustrial, SENA – Servicio Nacional de Aprendizaje,
kstrujillo@sena.edu.co, <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0006-7318-7189>

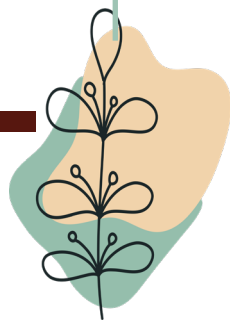
¹. Centro de Formación Agroindustrial, SENA – Servicio Nacional de Aprendizaje,
cordoneze@sena.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-1095-4468>

¹. Centro de Formación Agroindustrial, SENA – Servicio Nacional de Aprendizaje,
kyguzman@sena.edu.co, <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0003-3289-921X>

* Autor para correspondencia: adrico@sena.edu.co.

Como citar:

Rico, A., Lozano, K., Trujillo, K., Ordoñez, C., y Guzmán, K. (2024). Microorganismos asociados en la fermentación y calidad de cacao. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*, 11(1), 49-79.



Resumen

La fermentación del cacao se inicia con la poscosecha, cuando la mazorca es cortada, retirados sus granos y depositados en recipientes para su proceso de transformación. Este proceso tiene una duración que oscila entre dos y diez días, dependiendo de las condiciones de temperatura ambiente, altitud, humedad relativa, sitio de fermentación, la cantidad de cacao fermentado, el grado de madurez de las mazorcas, el material genético y las prácticas particulares de cada agricultor. Los granos de cacao experimentan transformaciones de descomposición internas y externas al inducir cambios bioquímicos por acción de microorganismos (levaduras y bacterias). La degradación de la pulpa inicia con el contacto con los microorganismos que degradan los compuestos presentes, permitiendo la separación de las semillas y la formación de productos químicos que permean la testa y generan cambios en el cotiledón (dentro del grano). Cuando se producen los cambios de temperatura, se generan cambios dentro del proceso de fermentación que, combinados con los cambios de pH, dan origen al color y del sabor del grano. Una fermentación adecuada se alcanza con temperaturas entre 40°C y 50°C durante todo el proceso. La actividad principal de las levaduras fermentativas es convertir la sacarosa, la fructosa y la glucosa en etanol y CO₂. En este proceso se deben tener en cuenta, factores como el tamaño de la pila (cantidad), la edad de la mazorca después de la cosecha, el tiempo de fermentación, el tiempo de secado y el número y momento de las vueltas/mezclas durante la fermentación. Lograr uniformidad homogénea mejora la calidad y el desarrollo de sabor y aroma óptimos.

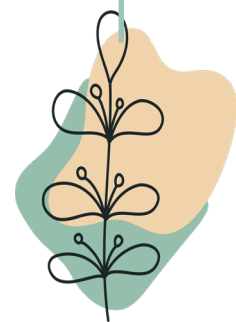
Palabras claves: Acidez, bacterias ácido lácticas, bacterias ácido acéticas, levaduras, pH, temperatura.



Abstract

Fermentation begins with the post-harvest, when the cocoa pod is cut, its beans removed and placed in containers for the fermentation process. The days of fermentation range from two to ten days, depending on the ambient temperature conditions, the fermentation site, the amount of fermented cocoa and the genetic material. Cocoa beans undergo internal and external transformations by inducing significant biochemical changes through the action of microorganisms (yeasts and bacteria). The genetic material, the state of ripeness of the pods, the conditions of temperature, altitude, relative humidity and the practices of each farmer are factors that are taken into account during this process. The degradation of the pulp begins with contact with the complex of microorganisms that degrade the compounds present, allowing the separation of the seeds and the formation of chemical products that permeate the testa and generate changes in the cotyledon (inside the bean). The death of the cotyledon cells degrades and increases their permeability, where the polyphenols (which produce the astringent taste) can diffuse into the adjacent cells where they meet various enzymes that cause hydrolytic reactions due to anaerobic conditions. When the temperature change is activated, changes are generated within the fermentation process, combined with pH changes, giving rise to the color and flavor formation of the grain. Adequate fermentation is achieved if the temperature is higher than 40°C and lower than 50°C during and until the fermentation time is completed. The main activity of fermentative yeasts is to convert sucrose, fructose and glucose into ethanol and CO₂. Several factors have been established in this process such as: the size of the pile (quantity), the age of the cob after harvest, the fermentation time, the drying time and the number and moment of the turns/mixes during fermentation. Achieving homogeneous uniformity improves quality, as well as a unique development of cocoa flavor and aroma.

Keywords: Acidity, lactic acid bacteria, acetic acid bacteria, yeasts, pH, temperature.



Introducción

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es una fruta tropical muy valiosa por sus atributos medicinales (Tornés, 2013) su árbol tiene pequeñas flores que se encuentran en su tronco y ramas, encargadas de producir una mazorca que contiene granos cubiertos de mucílago rico en azúcares (García, 2017). Las almendras, son fuente de alimento e importancia económica por los niveles de exportación alcanzados (Vélez et al., 2022).

El cacao es originario de la cuenca del Amazonas y las regiones tropicales adyacentes (Montamayor et al., 2002), ha sido un cultivo fundamental para muchas economías desde la época de las civilizaciones precolombinas, como los mayas y aztecas (Alvarado et al., 2023). Estas culturas no solo utilizaban el cacao como bebida y en rituales religiosos, sino que también lo valoraban por sus propiedades benéficas para la salud, por su contenido de antioxidantes y flavonoides, que han demostrado tener efectos positivos en enfermedades cardiovasculares, reducción del estrés y la ansiedad (Oussou et al., 2022).

La calidad del grano de cacao está dada por el material genético, los procesos de cosecha, poscosecha, fermentación, secado y tueste, factores que afectan directamente la calidad final del chocolate (Afoakwa et al., 2008), porque son responsables de desarrollar el aroma y sabor característicos del cacao (Rosales-Valdivia et al., 2024). En este sentido, la selección y utilización de microorganismos desempeñan un papel fundamental en la fermentación del cacao, y por lo tanto, en la calidad final del producto.

La fermentación de los granos de cacao experimenta transformaciones internas y externas al inducir cambios bioquímicos (De Vuyst & Leroy, 2020) significativos por acción de microorganismos (levaduras y bacterias) que mejoran su calidad y forman precursores de sabor, aroma y color característicos de los productos finales (D'Souza et al., 2018). Este proceso, se realiza generalmente de forma espontánea y artesanal en las plantaciones de cacao, y puede diferir por regiones, países o de un productor a otro (Lima et al., 2011).

Los objetivos principales de la fermentación son: 1) eliminar el mucílago (provocado por la aireación de los granos, facilitando el secado posterior) y 2) proporcionar el calor (temperatura superior a 42°C) y el ácido acético necesarios para inhibir la germinación, garantizando la adecuada fermentación de los granos (Thompson et al., 2012). Los componentes de reserva de los cotiledones están distribuidos en 50% de grasa, 15% de compuestos fenólicos, 12% de proteínas y 7% de carbohidratos



(Kadow et al., 2013). Por esta razón, es importante asegurar la uniformidad de los granos en la fermentación, para que los precursores de aroma y sabor se desarrollen de manera proporcional.

Otra variable importante en la fermentación es el pH de la masa de fermentación. Al iniciar el proceso de fermentación el pH de la masa es de 3-4 y se debe principalmente al ácido cítrico (Guehi et al., 2010; Afoakwa et al., 2013). El mucílago contiene sustancias orgánicas (proteínas y azúcares) que favorecen el crecimiento de los microorganismos que intervienen en la producción de etanol, ácido láctico y ácido acético (Santander Muñoz et al., 2020). Estos compuestos se difunden en los granos a través de la testa y posteriormente, inducen reacciones bioquímicas como la hidrólisis de proteínas en los cotiledones que conducen a granos de cacao bien fermentados (Schwan y Wheals, 2004).

53

Cacao a nivel nacional e internacional

Los principales productores de cacao a nivel internacional están ubicados en regiones donde las condiciones climáticas son favorables para la productividad del cultivo, con alturas entre los 0 y 1200 msnm, temperaturas que oscilan entre 22°C y 30°C, precipitación anual de 1.500 mm a 2.500 mm (FINAGRO, 2020).

La producción mundial de cacao es de 5.874.582 toneladas, siendo los países africanos los mayores productores, con el 74,8% (4.009.000 t.), destacándose Costa de Marfil (37,9%) y Ghana (18,8%). En Asia, los países productores tienen una participación del 5,3% del mercado mundial, siendo Indonesia el mayor productor (667.296 t.). En el continente americano, Ecuador (5,7%), concentra la producción más alta, seguido de Brasil (4,7%), Perú (2,9%), República Dominicana (1,3%) y Colombia (1,1%) con el 15,7% de la producción mundial (FAO, 2023). En Colombia, el área sembrada y la producción entre los años 2014 a 2021 aumentó en un 21,3% y 36,5%, respectivamente.

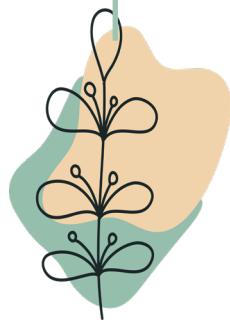
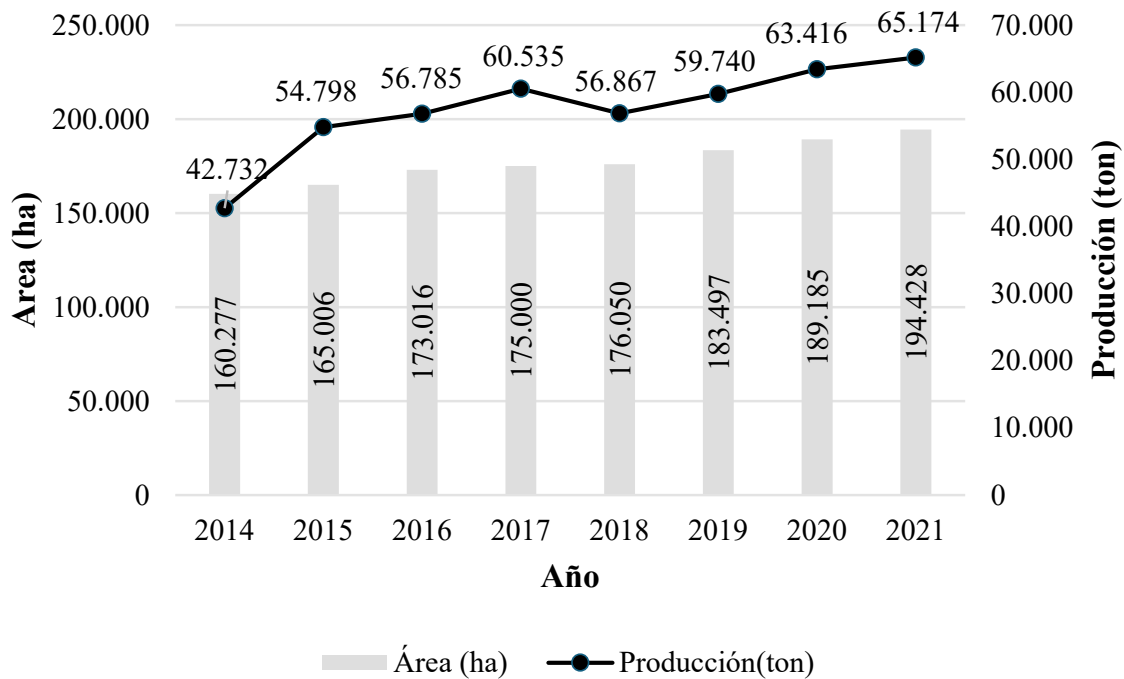


Figura 1.*Área sembrada y producción de cacao en Colombia 2014-2021.¹***Nota.** Adaptada de MADR-FEDECACAO (2021)

Colombia se destaca por producir cacao fino en aroma y sabor, con una distinción del 5% de la producción del grano mundial (Cedeño et al., 2022). El departamento de Santander es el principal productor nacional, con una participación del 41% seguido de Antioquia (9%), Arauca (8%), Huila (8%), Tolima (7%) y Nariño (5%) (SIOC, 2021).

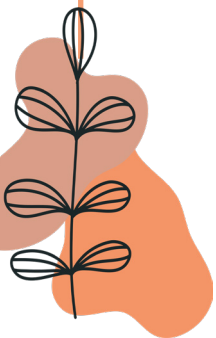
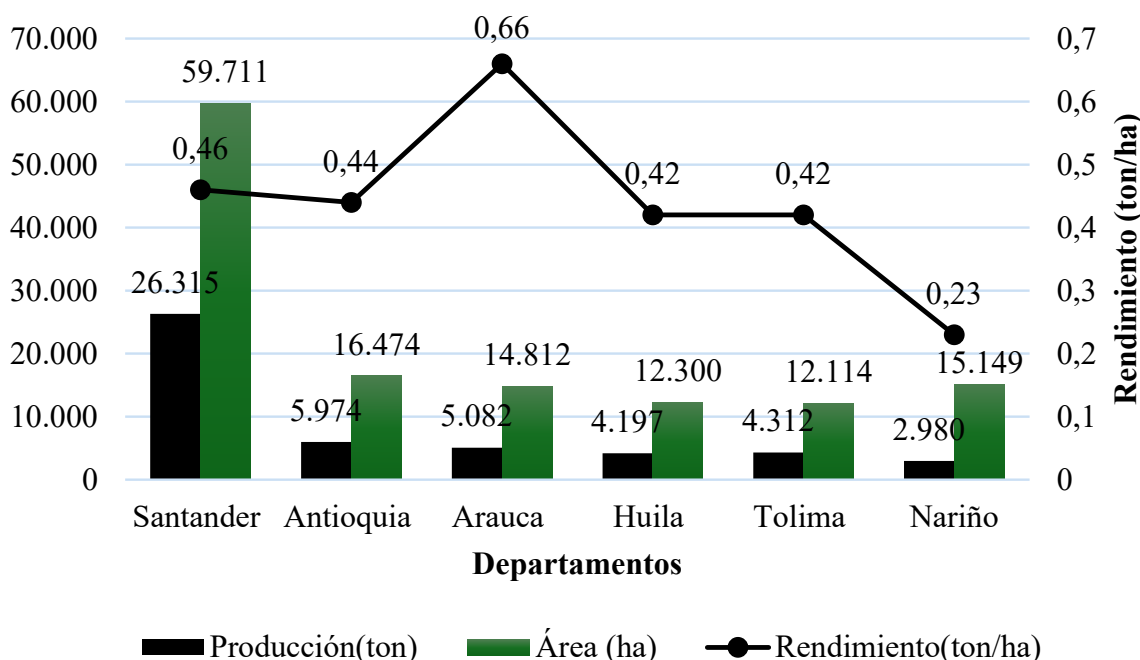


Figura 2.

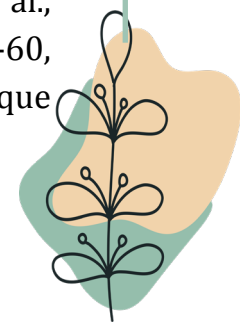
Producción, área sembrada y rendimiento de cacao en Colombia.



Nota. Adaptada de MADR-FEDECACAO (2021).

La buena calidad de la producción de cacao en Colombia proveniente de tres grupos morfogeográficos principales (Gonzáles et al., 2018): Forastero, Criollo y Trinitario (Cheesman, 1944). El cacao Criollo, originario de América del Sur y América Central (De la Cruz et al., 2012) es el más cultivado en Colombia, pero por ser susceptible a plagas y enfermedades, ha venido sido sustituido por el cacao forastero (Rodríguez et al., 2019), que cubre un 85% de la producción mundial, debido precisamente a la resistencia a plagas y enfermedades (Romero y Urrego, 2016). El Híbrido, también conocido como Trinitario, es un tipo de cacao de mayor resistencia y productividad, pero de menor calidad en comparación con el criollo (COCOTERRA, 2023; Andrade y Angulo, 2007).

En Colombia, desde mediados del siglo XX y hasta la primera década del siglo XXI, se propagaron de manera generalizada los cacaos híbridos, distribuyéndose en los departamentos de Santander, Arauca, Antioquia, Huila, Nariño y Tolima. Este cacao corresponde al cruzamiento natural entre los Forasteros y Criollos (Gordon et al., 2018). Los genotipos universales más conocidos son: el ICS-1, ICS-39, ICS-40, ICS-60, ICS-95, TSH-565, (Pinzón et al., 2014), originando una semilla híbrida comercial, que



amplió la diversidad de formas y colores del fruto, conservando la calidad genética del cacao fino y de aroma con herencia trinitaria (Aránzazu et al., 2009).

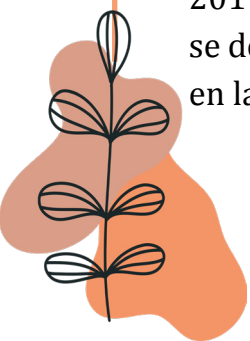
En Colombia existen aproximadamente 65.341 familias que cosecharon 63.416 t. de cacao en 189.185 ha (MADR, 2021). La importancia económica de las zonas cacaoteras en el país se debe principalmente al consumo interno de productos, sumada a las exportaciones que lo catalogan como cacao fino de aroma (95%) (Ríos et al., 2017; Swisscontact, 2014). presentando precios atractivos y diferenciados que han estado en constante crecimiento (Ríos et al., 2017).

A diferencia de otros países productores, Colombia tiene una demanda muy importante como materia prima en chocolatería, permitiendo el desarrollo de la industria nacional, facilitando la comercialización interna de la producción (Abbott et al., 2018). El dinamismo de la industria cacaotera ha contribuido con el recaudo de recursos económicos para el sector, permitiendo su crecimiento, innovación y desarrollo sistemas de servicios (Charry et al., 2019).

Fermentación en cacao

La fermentación inicia con la poscosecha, cuando la mazorca de cacao es cortada, retirados sus granos y depositados en un cajón de madera, recipiente plástico o en pilas, las cuales son cubiertas con hojas de *Musaseas spp.* o sacos (yute o fique) (Thompson et al., 2012). El material genético, el estado fitosanitario del cultivo, el rango de maduración de las mazorcas, las condiciones de temperatura, altitud, humedad relativa y las prácticas de cada agricultor, son los factores que inciden y se tienen en cuenta durante este proceso (Lima et al., 2011). Los días de fermentación oscilan entre dos y diez, de acuerdo con las condiciones de temperatura ambiente, sitio de fermentación, cantidad de cacao fermentado y material genético (Mendoza, 2020; Quevedo, 2018; Thompson et al., 2012; Álvarez et al., 2010; Cubillos et al., 2008).

La placenta une los granos de cacao que están envueltos por el mucílago (pulpa blanca y azucarada); constituido por 82%-87% de agua, 10%-15% de azúcar, 2%-3% de pentosanos, 1%-3% de ácido cítrico y 1%-1,5% de pectina convirtiéndolo en un medio favorable para el crecimiento microbiano (Afoakwa et al., 2008; Fowler y Coutel, 2017). Las levaduras, bacterias ácido lácticas (LAB) y bacterias ácido acéticas (AAB) se desarrollan en condiciones anaeróbicas y aeróbicas, respectivamente e intervienen en la fermentación de cacao (Rojas-Rojas et al., 2021).



La degradación de la pulpa inicia al contacto con los microorganismos que degradan los compuestos presentes, permitiendo la separación de las semillas y la formación de productos químicos que permean la testa y generan cambios en el cotiledón (dentro del grano) (Casco et al., 2023; Penagos, 2019). La muerte de las células del cotiledón degrada y aumentan su permeabilidad, donde los polifenoles (que producen el sabor astringente) se desplazan hacia las células adyacentes encontrándose con diversas enzimas que provocan reacciones hidrolíticas debido a las condiciones anaerobias. Si no se degradan, pasan al grano seco, provocando un color violeta de la almendra, que indica errores en el proceso de fermentación (Teneda, 2016).

Las levaduras presentes en la fase anaerobia, convierten el azúcar en alcohol en condiciones de bajo oxígeno con un pH inferior a 4, y las bacterias ácido lácticas, convierten los azúcares y algunos ácidos orgánicos en ácido láctico. En la fase aeróbica las bacterias del ácido acético (predominantes cuando la disponibilidad de oxígeno es mayor) son responsables de oxidar el alcohol en ácido acético (esta reacción es fuertemente exotérmica) y del aumento de la temperatura (**figura 3**), la cual puede aumentar hasta 50°C (122°F) (Afoakwa, 2016).

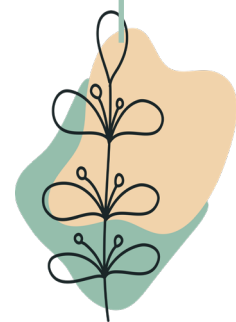
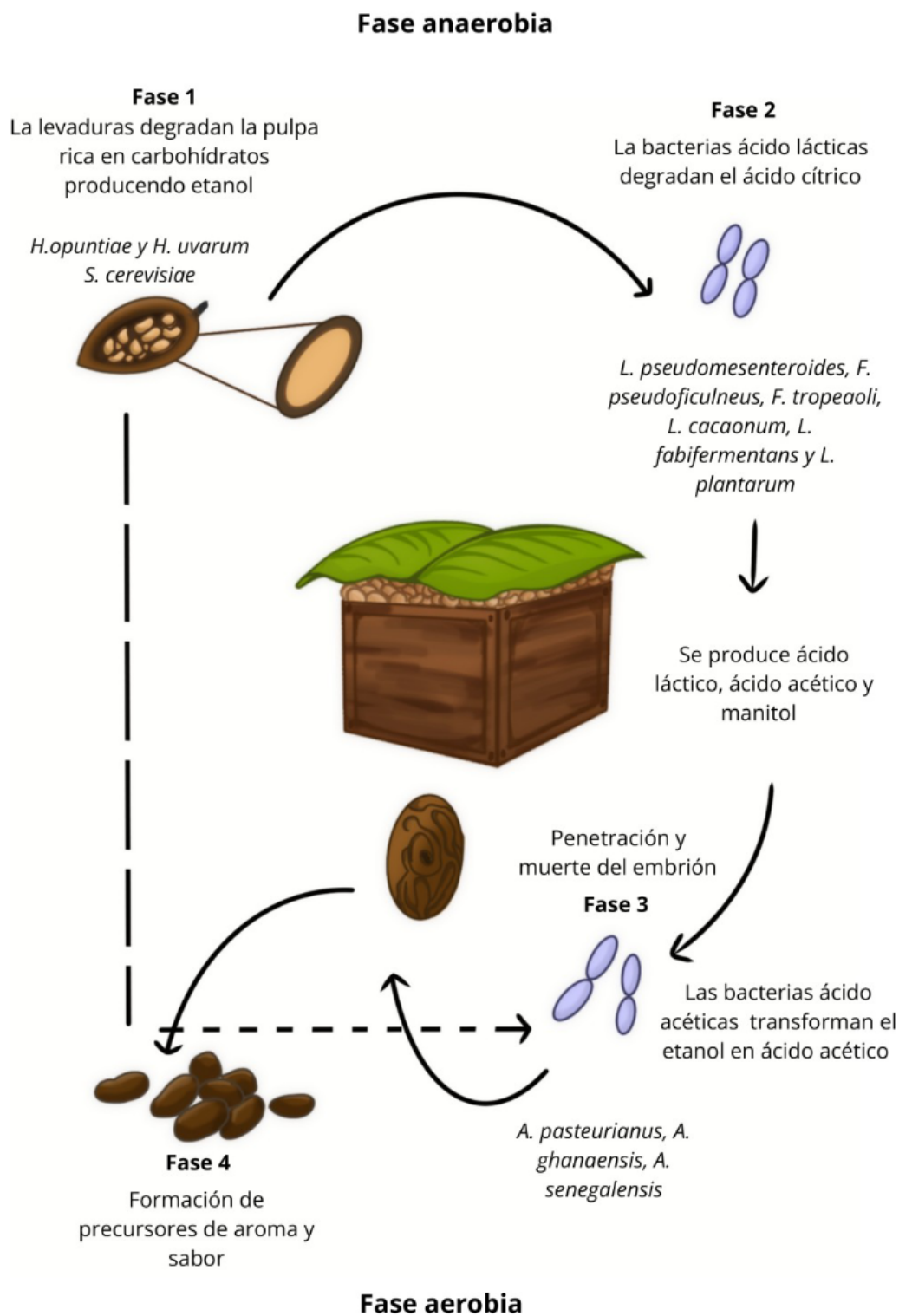


Figura 3.

Proceso de fermentación de los granos de cacao.



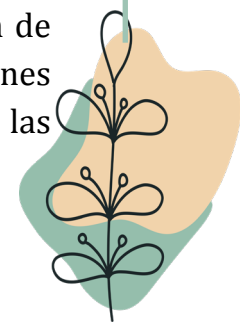
Al activarse el cambio de temperatura se generan cambios dentro de los granos de cacao en fermentación, que combinados con los cambios de pH, dan origen al color y sabor del grano (Viesser et al., 2021). Estos cambios producen compuestos como el etanol y el ácido acético, encargados de promover cambios fisicoquímicos importantes en las almendras (Ordoñez et al., 2019), así como cambios bioquímicos en el descenso del amargor y la astringencia, dando origen a los precursores del aroma y sabor a chocolate (Santander Muñoz et al., 2020; Ortiz et al., 2009). Es así cómo se desarrolla la pigmentación color marrón a partir de compuestos fenólicos (indicativo de la fermentación del grano), calidad física y química (Erazo et al., 2021).

La duración de la fermentación de cacao influye considerablemente en la calidad del producto, según el material genético, la altitud, la temporada de cosecha, las prácticas previas a la cosecha y el método de fermentación. Por ejemplo, la variedad Forastero, con su sabor pronunciado necesita de 5 a 8 días para asegurar el desarrollo completo de sus precursores de sabor, aroma y color; mientras que la variedad Criollo requiere un período más corto (Urbańska et al., 2021; Wood y Lass, 2008). La fermentación bien realizada es la condición previa para obtener un producto de buena calidad, pero si se realiza de manera incorrecta, la liberación de constituyentes aromatizantes específicos durante la fermentación será menor, reduciendo la calidad (Crafack et al., 2013).

Comportamiento de la temperatura y el pH durante la fermentación de cacao

El volumen mínimo para lograr una buena fermentación en el cacao es de 25 kg de granos húmedos (Mosquera et al., 2020; Schwan y Wheals, 2004). Desde el inicio de la fermentación hasta aproximadamente las 48 horas, la fermentación es anaeróbica debido a la densidad de la pulpa que recubre los granos; que cambia al momento de mover o airear la masa, causando enfriamiento temporal seguido de un aumento más rápido de la temperatura, generando una aireación que afecta la sucesión de los microorganismos (Bobiles et al., 2022). De acuerdo con Hatmi et al (2015) y Afoakwa et al (2008), la fermentación adecuada se alcanza con una temperatura superior a 40°C e inferior a 50°C durante todo el tiempo de fermentación.

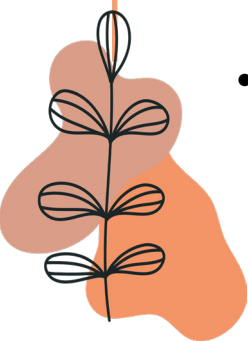
Según un estudio realizado por Bobiles et al (2022), para un proceso de fermentación (*Theobroma cacao* L.) a pequeña escala, con 5 kg de cacao húmedo más adición de cáscara de mazorca de cacao en nueve tratamientos (para mejorar las condiciones de temperatura), la temperatura inicial fue 28,8°C y 29,3°C, ascendió durante las



primeras 24 horas a 30,6°C - 41°C, a las 48 horas, a 35°C - 44°C, a las 72 horas, a 44,4°C - 48°C, a las 96 y 144 horas, a 45°C - 50°C. Mientras que el pH de la pulpa a las 0 horas osciló entre 3,85 y 4,02, a las 24 horas de fermentación estuvo entre 3,70 y 3,94. La tendencia continuó aumentando hasta el final de la fermentación, a las 144 horas, con pH entre 5,14 a 6,76 (Bobiles et al., 2022).

Por otro lado, Leal et al (2023) realizó un ensayo de fermentación durante dos años, evaluando la fermentación en cajones sin limpiar durante 168 horas y cajones limpios con 144 horas. En el primer año, la temperatura de fermentación aumentó gradualmente después de 48 horas en ambos tratamientos. Sin embargo, hubo un retraso en el aumento de la temperatura de la fermentación en la caja limpia, superando los 50°C después de 72 horas (el primer volteo ocurrió a las 96 horas). En la caja sin limpiar, el primer volteo se realizó a las 72 horas. La temperatura promedio en la caja sin limpiar y en la caja limpia fue de 48°C y 49,6°C, respectivamente. A continuación, se describen resultados obtenidos por Leal et al (2023):

- El comportamiento del pH inicial de la pulpa de la semilla en la caja sin limpiar y en la caja limpiada fue de 4,1 y 3,8 respectivamente, el pH inicial de los cotiledones fue de 6,5 y 6,3. En ambas fermentaciones, el pH de los cotiledones comenzó a disminuir después de 72 horas, llegando a valores inferiores a 5 a las 96 horas. El pH final de la pulpa de la semilla y del cotiledón fue similar en las dos cajas (caja sin limpiar: 4,7 y 4,6; caja limpia 4,9 y 4,8).
- Durante el segundo año, la temperatura de la masa de semillas de ambas fermentaciones aumentó después de 60 horas. En la fermentación de la caja sin limpiar, la masa de fermentación tardó más tiempo en alcanzar los 40°C (aprox. 80 horas), y los 50°C alrededor de las 84 horas (el primer volteo se produjo a las 96 horas). Después del primer volteo, la masa de fermentación no recuperó la temperatura, pero la mantuvo a 45°C para el siguiente volteo. Por el contrario, en la fermentación de la caja limpia, la masa de fermentación alcanzó los 40°C más rápido (alrededor de 70 horas), pero llegó a los 50°C sólo a las 120 horas. En la fermentación de caja limpia, el primer volteo de semillas se produjo a las 120 horas y fue el único que ocurrió. Las temperaturas de ambas fermentaciones superaron los 50°C en distintos momentos: en la caja sin limpiar a las 84 horas, y en la caja limpia a las 120 horas; la temperatura media fue de 47,7°C y 46,5°C, respectivamente.
- El pH inicial de la pulpa de la semilla en la caja sin limpiar y en la caja limpia fue de 3,8 y 3,9. El pH inicial de los cotiledones fue de 6,7 para cada fer-



mentación. Los valores se redujeron a 5,0 a las 96 horas. El pH final de la pulpa de la semilla en la caja sin limpiar y en la caja limpia fue de 5,8 y 4,6 y de 5 y 4,7 para los cotiledones.

El estudio anterior se relaciona con los metabolitos generados durante la fermentación, como el etanol y los ácidos láctico y acético, que pueden ingresar al cotiledón. Estas reacciones generan cambios en el pH, que pasa de neutro de 7 a valores más ácidos en el rango de 4-5,5, acompañada de un aumento de temperatura a 45°C o superior. Estas condiciones extremas provocan la inactivación del embrión y desencadenan reacciones enzimáticas en las que los productos resultantes se consideran precursores esenciales de aroma y sabor característicos del chocolate (Rosales-Valdivia et al., 2024).

El efecto del calor y la acidificación se pueden definir como factores clave en relación con la calidad del cacao. Además, se puede deducir que no son los microorganismos, sino sus metabolitos, los necesarios para una fermentación del cacao exitosa (Kadow et al., 2013).

Microorganismos asociados en las diferentes fases de la fermentación de cacao

El microbiota en la fermentación, se involucra en el proceso de degradación del mucílago de los granos de cacao, que influyen en el comportamiento de la temperatura de la masa fermentadora, el pH de la pulpa y la tensión de oxígeno (García-González et al., 2021; Camu et al., 2008). El pH inicial de la pulpa de cacao húmedo es aprox. 3,6; debido al ácido cítrico, el alto contenido de azúcar y el bajo suministro de oxígeno. Esto sucede debido a la estructura compacta que genera la masa del grano de cacao, favoreciendo la presencia de levaduras (las levaduras soportan concentraciones más altas de azúcar y toleran mejor pH bajos), que superan en número a las bacterias ácido lácticas –BAL– y otros organismos durante el primer día (Lima et al., 2011).

Las levaduras utilizan la pulpa ácida y rica en azúcares, para producir etanol con la presencia de algunas bacterias ácido lácticas. La actividad principal de las levaduras fermentativas es convertir la sacarosa, la fructosa y la glucosa en etanol y CO₂. En esta etapa, la acción de la levadura y las bacterias de ácido láctico, eleva la temperatura de la masa entre 30°C - 35°C después de 24 horas y a 35°C - 45°C después de 48 horas (Rojas-Rojas et al., 2021; Nielsen et al., 2007). El pH ácido de la pulpa de cacao se



debe al ácido cítrico, aunque permite el crecimiento de hongos, no es favorable para el crecimiento bacteriano, excepto para las BAL (Ouattara et al., 2016).

A medida que el aire comienza a penetrar en los granos debido a la degradación y la transpiración de la pulpa, la población de levadura disminuye y la población de bacterias del ácido láctico (BAL) aumenta. Alrededor de las 36 horas después de la fermentación, se espera que la población de BAL alcance su punto máximo. La aireación de los granos de cacao se mejora mediante la mezcla manual para ayudar a la penetración y uniformidad en la fermentación; la temperatura aumenta hasta los 45°C después de 72 horas y se mantiene entre los 45°C y 50 °C hasta que se completa la fermentación (Afoakwa et al., 2008).

En la figura 4, Oussou et al (2022) ilustra la liberación de precursores del aroma durante la fermentación del grano de cacao por cepas microbianas y sus actividades enzimáticas relacionadas, donde describe:

- Las proteínas en la pulpa de cacao y dentro de los granos, se metabolizan en péptidos y aminoácidos libres, es decir, precursores internos (tirosina, alanina y leucina) y precursores externos (fenilalanina) por reacción de proteólisis inducida por carboxipeptidasa y ciertas cepas de *Bacillus* y levaduras. Estos son los principales precursores del aroma.
- El ácido acético y el ácido láctico residual, con la acción colaborativa de enzimas endógenas como la endoproteasa aspártica y la carboxipeptidasa activan la producción de los precursores del aroma. La fructosa y la glucosa obtenidas a partir de la sacarosa por la invertasa presente en las levaduras, forman los precursores de los componentes del aroma durante la primera etapa de la fermentación. Las moléculas de sacarosa dentro de los granos también se convierten en glucosa y fructosa por la difusión de etanol, ácido acético y ácido láctico junto con la combinación de calor.
- La fructosa y la glucosa desarrollan activamente las sustancias aromáticas mediante la reacción de aminoácidos y péptidos en el segundo y tercer paso del proceso de poscosecha. Todos los precursores del aroma producidos por la acción microbiana durante la fermentación, son casi similares, la diferencia está en la cantidad, que se puede dar debido al tipo de fermentación, las prácticas, el clima, las condiciones previas a la cosecha y los factores geográficos.

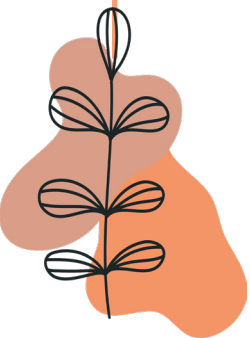
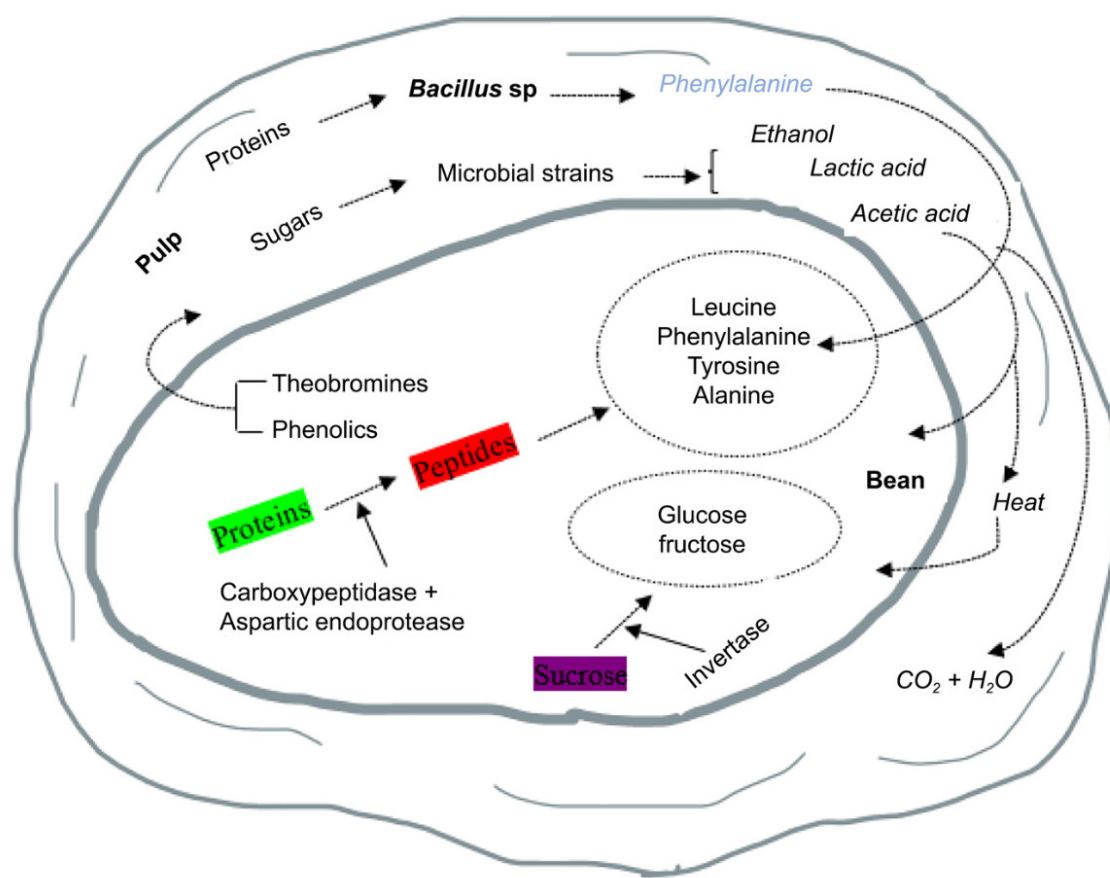


Figura 4.

La liberación de precursores del aroma durante la fermentación del grano de cacao por cepas microbianas y sus actividades enzimáticas relacionadas.



Nota. Oussou et al (2022)

En otros estudios relacionados por Tigrero-Vaca et al (2022), identificaron cambios en la abundancia relativa de taxones bacterianos a lo largo del período de fermentación (**figura 5**). Detectaron un total de 136 géneros bacterianos y 402 especies mediante NGS (métodos de secuenciación dependiente del cultivo y de próxima generación). Los géneros más abundantes al inicio del proceso de fermentación (0 h) fueron *Vibrio*, *Ktedonosporobacter* y *Halobacteroides*. Además, las especies más encontradas en esta etapa de la fermentación fueron *Vibrio anguillarum*, *Halobacteroides halobios* y *Ktedonosporobacter rubrisoli*. Entre las BAL, los géneros *Limosilactobacillus* y *Ligilactobacillus* tuvieron mayor abundancia relativa en las muestras; y en cuanto



a las especies, las más encontradas incluyeron *Limosilactobacillus fermentum* y *Lacticaseibacillus zeae*.

Las siguientes 24 horas de fermentación del cacao de aroma fino estuvieron marcadas por la presencia de géneros ambientales, como *Staphylococcus* y *Vibrio*, que estuvieron representados principalmente por *Staphylococcus aureus* y *Vibrio anguillarum*. En este punto temporal de fermentación, los géneros y especies de BAL más abundantes fueron *Limosilactobacillus*, *Acetilactobacillus*, *Limosilactobacillus fermentum* y *Lacticaseibacillus zeae*.

El segundo día de fermentación (48 h) estuvo dominado por los géneros ambientales *Zymomonas* y *Erwinia*. Los géneros de BAL también fueron abundantes e incluyeron *Liquorilactobacillus* y *Lentilactobacillus*. Las especies con mayor abundancia relativa en este momento de fermentación fueron *Escherichia coli*, *Vibrio anguillarum*, *Limosilactobacillus fermentum* y *Lacticaseibacillus zeae*.

Después de 72 horas de fermentación, los géneros bacterianos más abundantes fueron *Escherichia*, *Pantoea*, *Staphylococcus*, *Limosilactobacillus*, *Lentilactobacillus* y *Acetobacter*. Además, entre las especies prevalentes se encontraron *Escherichia coli*, *Staphylococcus cohnii*, *Vibrio anguillarum*, *Limosilactobacillus fermentum*, *Lacticaseibacillus zeae* y *Acetobacter pasteurianus*.

Finalmente, al final de la fermentación (96 h), los géneros y especies más numerosos fueron *Acetobacter*, *Alkalihalobacillus*, *Limosilactobacillus*, *Lentilactobacillus*, *Acetobacter sp.*, *Alkalihalobacillus clausii*, *Limosilactobacillus fermentum* y *Lentilactobacillus hilgardii*.

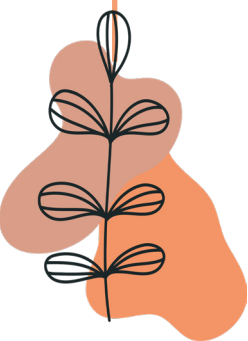
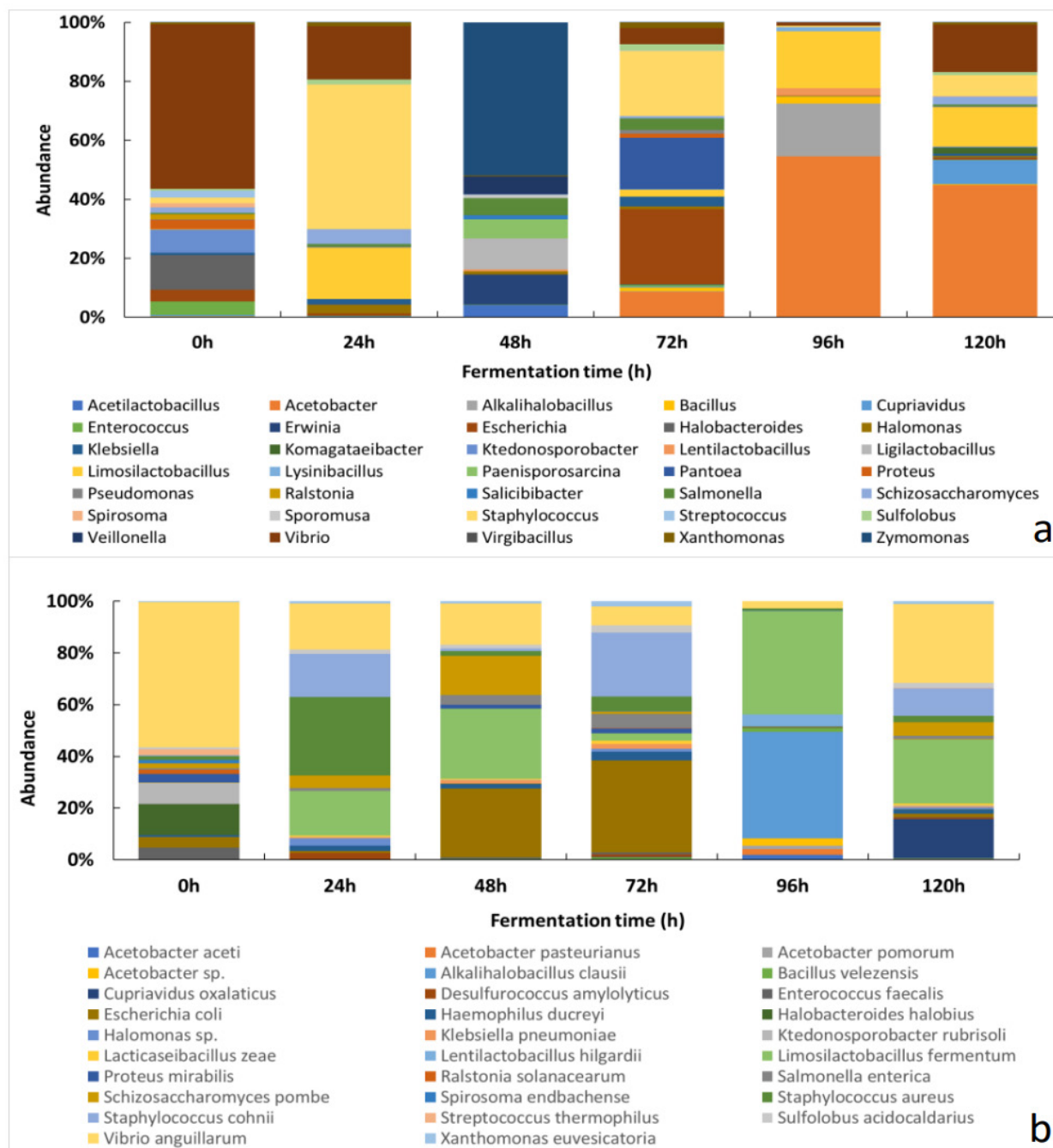
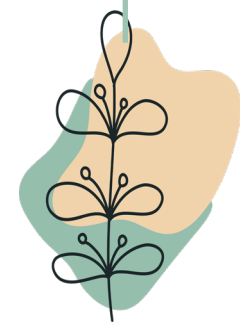


Figura 5.

Abundancia relativa de taxones bacterianos en la fermentación del cacao de sabor fino: (a) 30 géneros bacterianos más abundantes; (b) 30 especies bacterianas más abundante.



Nota. Tigrero-Vaca et al (2022)



Además, hallaron a lo largo del periodo de fermentación un total de 42 géneros y 57 especies de hongos mediante análisis NGS (**figura 6**). Al inicio de la fermentación (0 h), géneros como *Botrytis*, *Tetrapisispora*, *Pichia* y *Cándida* mostraron la mayor abundancia relativa, mientras que las especies más detectadas fueron *Cándida glabrata*, *Cándida orthopsilosis*, *Pichia kudriavzevii* y *Botrytis cinerea*.

Después de 24 h de fermentación, *Pichia*, *Cándida*, *Botrytis* y *Pochonia* fueron los géneros más observados, mientras que *Pichia kudriavzevii*, *Cándida glabrata*, *Botrytis cinerea* y *Pochonia chlamydosporia* fueron las especies más abundantes.

Después de 48 horas de fermentación, *Cándida*, *Pichia* y *Botrytis* fueron los géneros más abundantes, mientras que *Cándida glabrata*, *Pichia kudriavzevii* y *Botrytis cinerea* mostraron la mayor cantidad entre las especies de hongos detectadas.

Después de 72 horas de fermentación, los géneros de hongos más encontrados fueron *Fusarium*, *Kazachstania*, *Botrytis*, *Cándida* y *Zygosaccharomyces*, y las especies de hongos más abundantes, los *Fusarium fujikuroi*, *Botrytis cinerea*, *Cándida glabrata* y *Zygosaccharomyces rouxii*.

La última etapa de fermentación (96 h) se caracterizó por la presencia de géneros, como *Pichia*, *Cándida* y *Lachancea*, que estuvieron representados principalmente por *Pichia kudriavzevii*, *Cándida glabrata* y *Lachancea thermotolerans*.

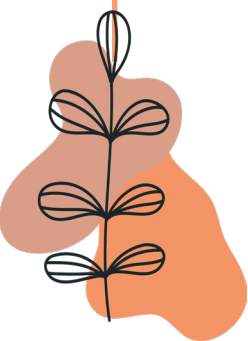
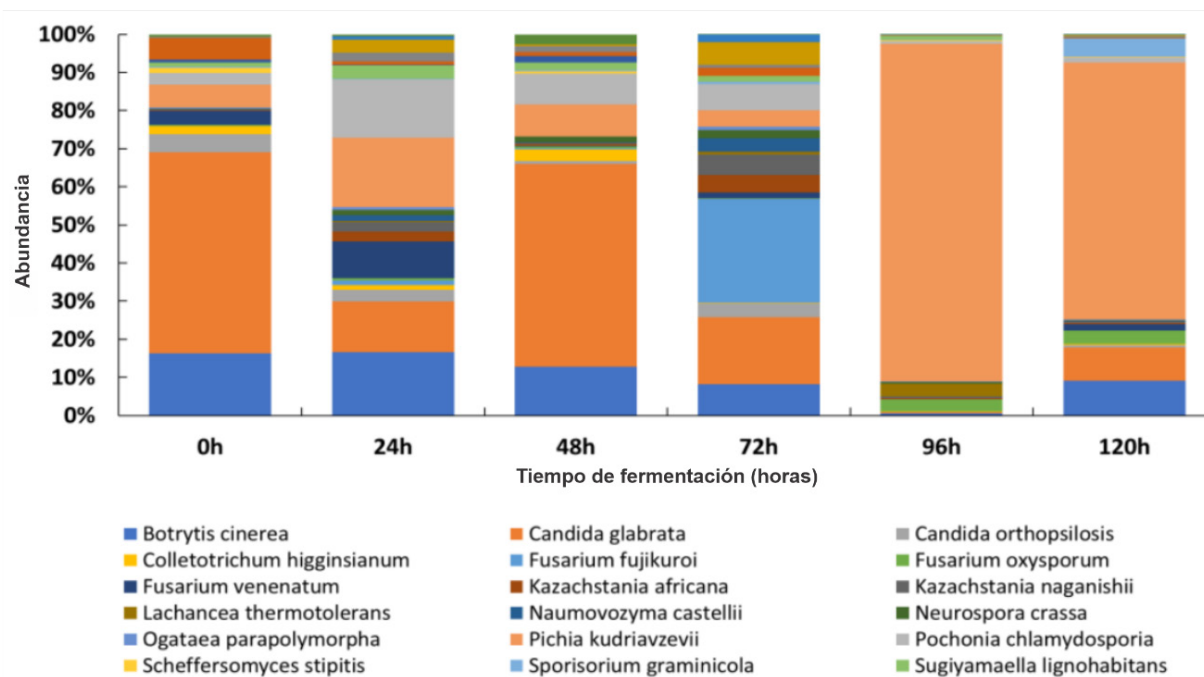
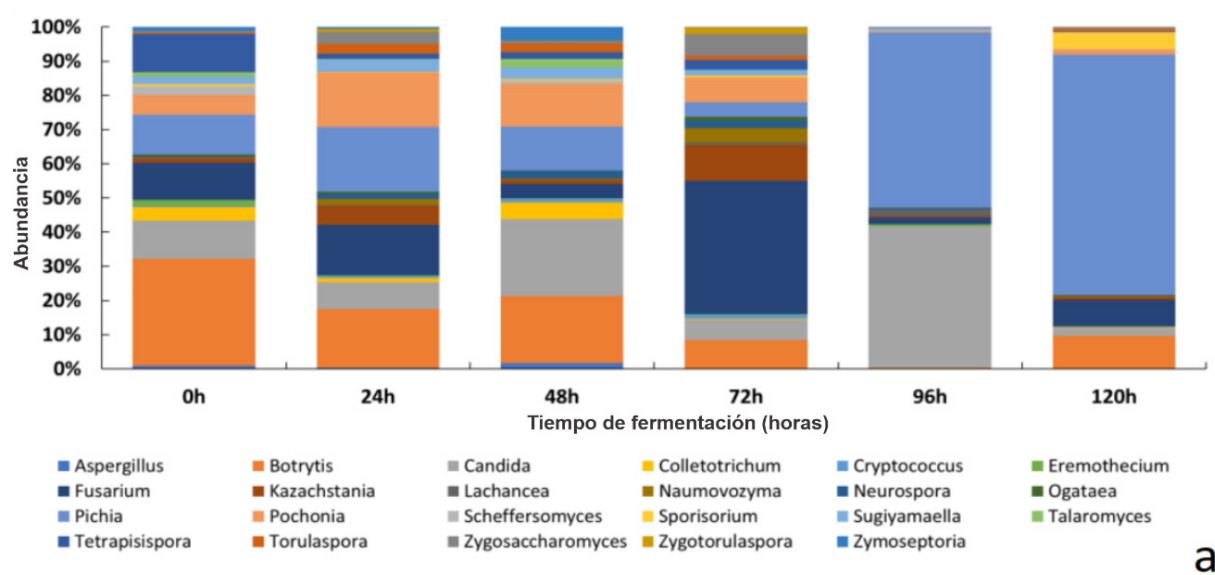
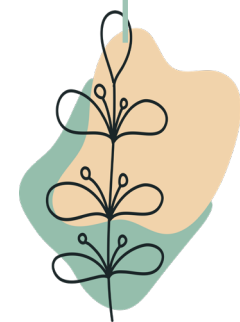


Figura 6.

Abundancia relativa de taxones de hongos en diferentes momentos de fermentación: (a) 30 géneros de hongos más abundantes; (b) 30 especies de hongos más abundantes.



Nota. Tigrero-Vaca et al (2022)



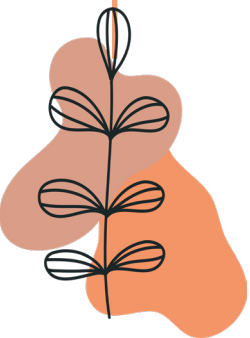
Por otro lado, Leal et al (2023) realizaron aislamientos de levaduras en la pulpa de la semilla de cacao presentes en la fermentación de cajones limpios (168 horas) y sin limpiar (144 horas) (**tabla 2**). La especie más frecuente en ambas fermentaciones fue *W. anomalus*, pero su representatividad fue menor en las realizadas en la caja limpia. El recuento más alto de levaduras se presentó en las primeras 48 horas, después de las 72 horas disminuyó y se estabilizó hasta finalizar la fermentación.

Tabla 2.

Especies de levadura, número de aislamientos y frecuencia relativa obtenidos durante el 1er año en la pulpa de semillas fermentadas de la caja de fermentación limpia y sin limpiar.

Especies de levadura	Caja sin limpiar		Caja limpia	
	Total	%	Total	%
<i>Wickerhamomyces.anomalus*</i>	26	54,2	23	33,8
<i>Cándida quercitrusa</i>	6	12,5	5	7,4
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	5	10,4	4	5,9
<i>Cándida sp.</i>	4	8,3	7	10,3
<i>Wickerhamomyces sp.</i>	2	4,2	4	5,9
<i>Cándida intermedia</i>	1	2,1	13	19,1
<i>Pichia manshurica</i>	1	2,1	4	5,9
<i>Torulaspora delbrueckii</i>	1	2,1	4	5,9
<i>Pichia galeiformis</i>	1	2,1	1	1,5
<i>Meyerozyma guilliermondii</i>	1	2,1	0	0
<i>Pichia kluyveri</i>	0	0	1	1,5
<i>Cándida natalensis</i>	0	0	1	1,5
<i>Saccharomyces chevalieri</i>	0	0	1	1,5
Total	48	100	68	100

Nota **Wickerhamomyces anomalus* es sinónimo de *Cándida pelliculosa*, *Pichia anómala*, *Hansenula anómala*.



Criterios de calidad del grano de cacao como resultado de la fermentación

Los comerciantes prefieren comprar granos húmedos de cacao a los pequeños agricultores, ya que no es común encontrar uniformidad en los granos comerciales, reduciendo las oportunidades de agregar valor (Bobiles et al., 2022). Esta situación se presenta porque no se cuenta con el volumen de granos húmedos necesario para fermentar (Schwan y Wheals, 2004). Una fermentación adecuada requiere al menos 25 kg de granos de cacao para alcanzar la temperatura requerida (45°C - 50°C) (Afoakwa et al., 2008), siendo esta, una cantidad muy elevada para la mayoría de los pequeños cacaocultores que cuentan con áreas menores a tres hectáreas (MinAgricultura, 2021), y no tienen otra opción que vender los granos recién cosechados, omitiendo el proceso de fermentación (Ramos, 2016).

La fermentación es un parámetro que influye en la calidad de los granos fermentados (Rojas-Rojas et al., 2021). En este proceso se han establecido las variables que afectan el óptimo desarrollo de la fermentación: 1) el tamaño de la pila que depende de la cantidad de cacao a fermentar 2) el estado de maduración de la mazorca después de la cosecha, 3) el tiempo de fermentación, 5) el tiempo de secado y 6) el número y momento de los volteos durante la fermentación (Morales, 2020; Camu et al., 2008).

La fermentación del cacao induce cambios bioquímicos en los granos que dan lugar a diferentes calidades: granos pizarrosos (sin fermentar), violetas (poco fermentados) y marrones (completamente fermentados). Esta heterogeneidad de calidad en un conjunto de muestras puede afectar la calidad de los productos finales (Tchouatcheu et al., 2019). En Colombia, la calidad del grano de cacao se realiza a través de la Norma Técnica Colombiana NTC 252:2021, donde se establece la metodología sobre los requisitos de calidad (evalúa presencia de hongos, insectos, impurezas o materias extrañas, residuos y granos planos en granos de cacao secos, porcentaje de humedad y clasificación del grano).

Asimismo, a través de la prueba de guillotina (corte longitudinal a 100 granos de cacao por muestra) (Machado et al., 2018), se evalúan mediante observación, los granos dañados por insectos, germinados y mohosos, además de la coloración interna, clasificándolos en: 1) granos completamente fermentados, 2) parcialmente fermentados, y 3) sin fermentar (NTC 1252, 2021). Los valores para clasificar como grano de cacao premium, deben superar el 70% de granos bien fermentados, masa (peso) en gramos de 100 granos y contenido de humedad del 7%, entre otros (**tabla 3**).

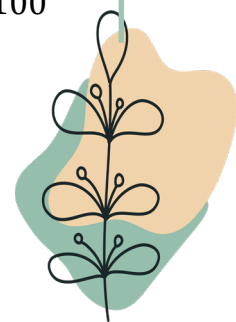
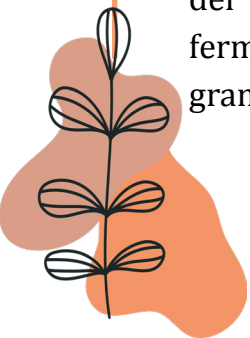


Tabla 3.*Clasificación del cacao en grano para comercialización nacional.*

Requisitos físicos y químicos	Clasificación del cacao en grano		
	Premium/ Especial	Estándar	Corriente
Granos bien fermentados, en % mín.	70	65	55
Granos insuficientemente fermentados y violetas, en % máx.	30	35	45
Masa (peso) en gr. de 100 granos	>120	95-120	<95
Contenido de humedad, en % fracción de masa, máx.	7	7,5	7,5
Tolerancias para el cacao en grano			
Contenido de impurezas o materias extrañas, en % fracción de masa, máx.	0	0,3	0,5
Grano con moho interno, número de granos/100 granos, máx.	1	3	5
Grano dañado por insectos o germinados o ambos, número de granos/100 granos, máx.	1	2	3
Contenido de grano partido, número de granos/100 granos, máx.	1	2	5
Contenido de almendra en % fracción de masa, mín.	n.a.	n.a.	40-60
Granos sin fermentar (pizarrosos), en %, máx.	1	3	5
n.a.:	No es aceptable.		
Fracción de masa:	Fracción de la masa que se evalúa respecto a la masa total.		
	El término almendra se refiere al cotiledón o fragmento de cotiledón del grano de cacao.		

Nota. NTC 1252 de 2021

En este sentido, Machado et al (2023) en evaluación de la calidad física y sensorial de grano de *Theobroma cacao* L. en respuesta a procesos de beneficio en municipios del norte del departamento del Huila, encontraron porcentajes de granos bien fermentados entre 48% y 57,67%, clasificándose en la categoría de grano corriente, y granos insuficientemente fermentados con valores que oscilaron en 21,83% y 30,67%.



Estos resultados se pueden dar por un establecimiento inadecuado de protocolos de fermentación. Lo anterior se relaciona con lo propuesto por Murcia-Artunduaga et al (2022), quienes mencionan una relación entre el porcentaje de granos insuficientemente fermentados y el proceso de fermentación de cacao.

El valor agregado en la venta de granos fermentados será significativo para los agricultores cuando se disponga de la tecnología para fermentar pequeños volúmenes. Dado que el volumen de material fermentable es un requisito (Bobiles et al., 2022). En la actualidad, el proceso de fermentación del cacao que se practica en nuestro planeta es, en su mayoría de forma tradicional. El arte de utilizar cultivos iniciadores para sustituir los microorganismos naturales en la fermentación del cacao, es crucial para el desarrollo del aroma y el sabor, con el fin de lograr uniformidad sostenible y mejora de la calidad, (Hirko et al., 2023).

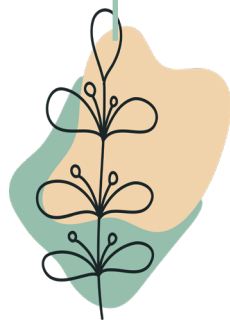
71

Conclusiones

El cacao colombiano presenta características particulares en el mercado por estar clasificado como fino y aroma. Los atributos dependen inicialmente del cultivar de la planta, el estado de maduración de las mazorcas, las condiciones climáticas y las prácticas particulares de cada agricultor. El papel de los microorganismos en las fases anaeróbicas y aeróbicas son esenciales para degradar el mucílago y aumentar la temperatura para proporcionar el calor y el ácido acético necesarios para inhibir la germinación de los granos que interviene finalmente en la calidad.

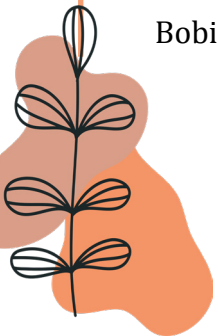
Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un posible conflicto de intereses.

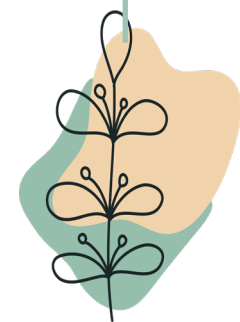


Referencias bibliográficas

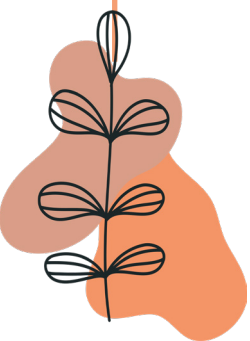
- Abbott, P. C., Benjamin, T. J., Burniske, G. R., Croft, M. M., Fenton, M., Kelly, C. R., Lundy, M., Camayo, R., Wilcox, M. D. (2018). An analysis of the supply chain of cacao in Colombia. Pudue University and the International Center for Tropical Agriculture (CIAT). 208 p.
- Afoakwa, E., Paterson, A., Fowler, M., Ryan, A. (2008). Flavor formation and character in cocoa and chocolate: a critical review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 48(9), 840-857. <https://doi.org/10.1080/10408390701719272>
- Afoakwa, E., Kongor, J., Takrama, J., & Budu, A. (2013). Changes in nib acidification and biochemical composition during fermentation of pulp pre-conditioned cocoa (*Theobroma cacao*) beans. *International Food Research Journal*, 20(4), 1843–1853. <https://csirspace.foodresearchgh.org/handle/123456789/1338>
- Afoakwa, E. (2016). History, origin and taxonomy of cocoa. *Chocolate Science and Technology*. <https://doi.org/10.1002/9781118913758.ch1>
- Álvarez, C., Tovar, L., García, H., Morillo, F., Sánchez, P., Girón, C., De Farias, A. (2010). Evaluación de la calidad comercial del grano de cacao (*Theobroma cacao* L.) usando dos tipos de fermentadores. *Revista científica UDO agrícola*, 10(1), 76-87. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3909942>
- Alvarado, M. C., Sanchez, P. D. C., & Polongasa, S. G. N. (2023). Emerging rapid and non-destructive techniques for quality and safety evaluation of cacao: recent advances, challenges, and future trends. *Food Production, Processing and Nutrition*, 5(1), 40. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s43014-023-00157-w>
- Andrade-Aguirre, CM y Angulo-Reynoso, V. (2007). La viabilidad económica del cultivo del cacao en México a través de una economía sostenible (Tesis de pregrado). Universidad de las Américas Puebla. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lri/andrade_a_cm/
- Aranzazu, F., Martínez, N., Palencia, G., Coronado, R., Rincón, D. (2009). Manejo del recurso genético para incrementar la producción y productividad del sistema de cacao en Colombia. Unión Temporal Cacao de Colombia Uno. FEDECACAO, CORPOICA y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 29 –109p.
- Bobiles, S. C., Elegado, F. B., Millena, C. G., & Merca, F. E. (2022). Small-scale cacao (*Theobroma cacao* L.) fermentation process utilizing cacao pod husk. *Food Research*, 6(4). [https://doi.org/https://doi.org/10.26656/fr.2017.6\(4\).502](https://doi.org/https://doi.org/10.26656/fr.2017.6(4).502)



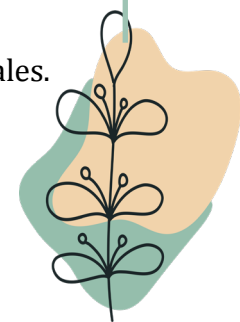
- Briones, M. Q., & Zambrano, J. C. (2023). Capacidad exportadora y su incidencia en la internacionalización de las pequeñas y medianas empresas productoras de cacao orgánico en la provincia de Manabí. *593 Digital Publisher CEIT*, 8(2), 80-89. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9124229>
- Charry, A., Castro-Llanos, F., Castro-Nuñez, A. (2019). Estudio de línea base de la cadena del cacao en Colombia: Oportunidades y limitaciones para el desarrollo de la cadena, la conservación y restauración de bosques y la construcción de paz. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Palmira, Valle del Cauca. 57p.
- Cheesman, E.E. (1944). Notes on the nomenclature, classification and possible relationships of cocoa population. *Trop. Agric.* 21: 144-159. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19451600059>
- Casco, M., Murillo, G., Soria, G., Murillo, H. (2023). Métodos de fermentación en el cacao ccn-51 con norma inen 176 en la parroquia Guasaganda. *Polo del Conocimiento*, 6 (8) 613 – 633. <https://doi.org/10.23857/pc.v8i6>
- Camu, N., de Winter, T., Addo, S. K., Takrama, J. S., Bernaert, H., & de Vuyst, L. (2008). Fermentation of cocoa beans: influence of microbial activities and polyphenol concentrations on the flavour of chocolate. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(13), 2288–2297. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.3349>
- Crafack, M., Mikkelsen, M. B., Saerens, S., Knudsen, M., Blennow, A., Lowor, S., Takrama, J., Swiegers, J. H., Petersen, G. B., Heimdal, H., & Nielsen, D. S. (2013). Influencing cocoa flavour using *Pichia kluyveri* and *Kluyveromyces marxianus* in a defined mixed starter culture for cocoa fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 167(1), 103–116. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.06.024>
- COCOTERRA. (2023). 10 distinct varieties of cacao: Ultimate cacao guide. Disponible en <https://www.cocoterra.com/10-distinct-varieties-of-cacao/>
- D'Souza, R. N., Grimbs, A., Grimbs, S., Behrends, B., Corno, M., Ullrich, M. S., & Kuhnert, N. (2018). Degradation of cocoa proteins into oligopeptides during spontaneous fermentation of cocoa beans. *Food Research International*, 109, 506–516. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.068>
- De Vuyst, L., & Leroy, F. (2020). Functional role of yeasts, lactic acid bacteria and acetic acid bacteria in cocoa fermentation processes. *FEMS Microbiology Reviews*, 44(4), 432–453. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/femsre/fuaa014>



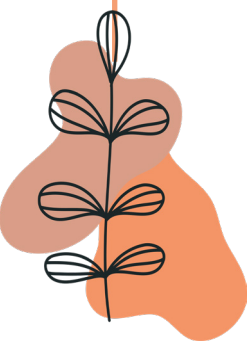
- De La Cruz-Medina, J., Vargas-Ortiz, M., & Del Ángel-Coronel, O. (2012). Cacao: operaciones poscosecha. Food and Agriculture Organization Of the United Nations (FAO). <http://www.fao.org/3/a-au995s.pdf>
- FAO. (2023). With major processing by Our World in Data. "Cocoa bean production – FAO" [dataset]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, "Production: Crops and livestock products". <https://ourworldindata.org/grapher/cocoa-bean-production>
- FINAGRO. (2020). Ficha de inteligencia: Cacao. Unidad de Gestión de Riesgos Agropecuarios (UGRA). Bogotá, D.C.
- García-Alamilla, P., Hernández-Hernández, C., y Salgado-Cervantes, M. A. (2017). La fermentación del cacao: procesos bioquímicos y su impacto en la calidad del chocolate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(5), 1073-1087.
- García-González, E., Ochoa-Muñoz, A. F., Montalvo-Rodríguez, C., Ordoñez-Narvaéz, G. A., Londoño-Hernández, L. (2021). Sucesión microbiana durante la fermentación espontánea de cacao en unidades productivas. *Ciencia en Desarrollo*, 12 (2). 21-30. <https://doi.org/10.19053/01217488.v12.n2.2021.12242>
- Gonzáles, R., Silva, N., Calderón, A., & Castañeda, D. (2018). Evaluación y caracterización de clones regionales de cacao en la subregión del Urabá antioqueño: fase i. *Revista Nova*, 4, 21–30. <https://doi.org/10.23850/25004476.2022>
- Gordon, R. A. G., Silva, N. D., Calderón, A. S., & Sánchez, D. A. C. (2018). Evaluación y caracterización de clones regionales de cacao en la subregión del Urabá antioqueño: fase I. *Revista Nova*, 4, 21-30. <https://doi.org/10.23850/25004476.2022>
- Erazo, C., Bravo, K., Túarez, D., Fernández A., Torres, Y., Vera, J. (2021). Efecto de la fermentación de cacao (*Theobroma cacao* L.), variedad nacional y trinitario, en cajas de maderas no convencionales sobre la calidad física y sensorial del licor de cacao. *Revista de Investigación Talentos*, 8(2), 42-55. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8551316>
- Fowler, M., Coutel, F. (2017). Cocoa beans: from tree to factory. Beckett's Industrial Chocolate Manufacture and Use, Fifth Edition. <https://doi.org/10.1002/9781118923597.ch2>
- FAO. (2023). With major processing by Our World in Data. "Cocoa bean production – FAO" [dataset]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, "Production: Crops and livestock products". <https://ourworldindata.org/grapher/cocoa-bean-production>



- Hatmi, R. U., Kobarsih, M., & Cahyaningrum, N. (2015). Fungi Level Analysis of Cocoa Beans Based on Fermentation Box Type and Duration. *Procedia Food Science*, 3, 371–382. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.profoo.2015.01.041>
- Guehi, T. S., Dadie, A. T., Koffi, K. P. B., Dabonne, S., Ban-Koffi, L., Kedjebo, K. D., & Nemlin, G. J. (2010). Performance of different fermentation methods and the effect of their duration on the quality of raw cocoa beans. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(12), 2508–2514. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02424.x>
- Hirko, B., Mitiku, H., & Getu, A. (2023). Role of fermentation and microbes in cacao fermentation and their impact on cacao quality. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*, 3(4). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s43393-023-00160-9>
- Kadow, D., Bohlmann, J., Phillips, W., & Lieberei, R. (2013). Identification of main fine flavour components in two genotypes of the cocoa tree (*Theobroma cacao* L.). *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 86(1). <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2013.086.013>
- Lima, L. J. R., Almeida, M. H., Nout, M. J. R., & Zwietering, M. H. (2011). *Theobroma cacao* L., “The Food of the Gods”: Quality Determinants of Commercial Cocoa Beans, with Particular Reference to the Impact of Fermentation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51(8), 731–761. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10408391003799913>
- Leal, G. A., Marques, T., Marques, M. B. M., da Silva, A. P. M., de Oliveira, M. P. M., Gomes, L. H., Coelho, I. da S., & Figueira, A. (2023). Fermentation box cleaning can impair cacao seed fermentation. *Food Science and Technology (Brazil)*, 43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/fst.109322>
- Machado, L., Sánchez, J., Chila, A., Murcia, V., Saavedra, D., Cano, O., Guzmán, K., Ordoñez C. (2018). *Prácticas y procesos que inciden en el aseguramiento de la calidad del cacao Theobroma cacao L.* (Nodo La Angostura, Ed.). Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). <https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/7271>
- Machado Cuellar, L., Medina Ríos, E. L., Guzmán Pacheco, K. Y., & Ordoñez Espinosa, C. M. (2023). Evaluación de la calidad física y sensorial de grano de *Theobroma cacao* L. en respuesta a procesos de beneficio en municipios del norte del Huila, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(1), 137–156. <https://doi.org/https://doi.org/10.22490/21456453.6710>
- MADR. 2021. Cadena de cacao, cifras sectoriales. Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales.

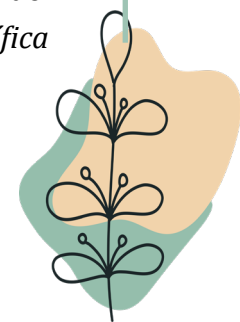


- MinAgricultura. (2021). Cadena de cacao. Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. Bogotá, D.C.
- Mendoza, K. (2020). Evaluación de métodos de fermentación y su efecto en la calidad del grano mediante el sostenimiento de 5.000 m² de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el municipio de Landázuri Santander (Tesis de pregrado). Universidad de la Salle, El Yopal.
- Motamayor, J. C., Risterucci, A. M., López, P. A., Ortiz, C. F., Moreno, A., & Lanaud, C. (2002). Cacao domestication I: the origin of the cacao cultivated by the Mayas. *Heredity*, 89(5), 380–386. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800156>
- Mosquera, J. A. N., Escobar, K. Y. R., Morejon, J. P. A., & Llaguno, S. S. (2020). Métodos de fermentación del cacao nacional (*Theobroma cacao*) y su influencia en las características físico-químicas, contenido de cadmio y perfiles sensoriales. *Alternativas*, 21(3), 42-48. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8065046>
- Murcia-Artunduaga, K., Gasca-Torres, L., y del Rosario, M. (2022). Evaluación físico-sensorial de granos de cacao (*Theobroma cacao* L.), región sur del Huila (Colombia). *Informador Técnico*, 86(2), 194-204. <https://doi.org/10.23850/22565035.4358>
- Morales, L. I. (2020). *Fermentación asistida de cacao (Theobroma cacao) y participación de Zamorano en la investigación e innovación de derivados de este cultivo: Revisión literaria* (Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2020).
- Nielsen, D. S., Teniola, O. D., Ban-Koffi, L., Owusu, M., Andersson, T. S., & Holzapfel, W. H. (2007). The microbiology of Ghanaian cocoa fermentations analysed using culture-dependent and culture-independent methods. *International Journal of Food Microbiology*, 114(2), 168–186. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2006.09.010>
- Ordoñez, E., Vera, J., Tigselema, S. M. (2019). Cascarilla de cacao (*Theobroma cacao* L.) De líneas híbridas para la elaboración de rehiletes de chocolate. *Revista Universidad y Sociedad*, 11(2), 136-141.
- Ortiz, L., Graziani, L., Rovedas, G. (2009). Influencia de varios factores sobre características del grano de cacao fermentado y secado al sol. *Agronomía Tropical*, 59 (2), 119-127. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2009000200001
- Oussou, K. F., Guclu, G., Kelebek, H., & Selli, S. (2022). Elucidating the contribution of microorganisms to the spontaneous fermentation and the quality of Ivorian cacao (*Theobroma cacao*) beans: The quality of Ivorian cacao (*Theobroma cacao*) beans. *Quality*

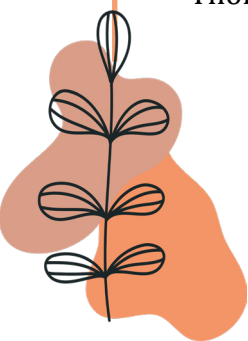


Assurance and Safety of Crops & Foods, 14(4), 23–35. <https://doi.org/https://doi.org/10.15586/qas.v14i4.1078>

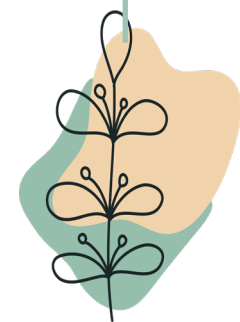
- Ouattara, D., Ouattara, H., Adom, J., Goualié, B., Koua, G., Doué, G., & Niamke, S. (2016). Screening of Lactic Acid Bacteria Capable to Breakdown Citric Acid during Ivorian Cocoa Fermentation and Response of Bacterial Strains to Fermentative Conditions. *British Biotechnology Journal*, 10(3), 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.9734/BBJ/2016/19279>
- Pinzón, J., Rojas A.J. & Rojas, F. (2014). Guía técnica para el cultivo del cacao, Federación Nacional de cacaoteros. Fondo Nacional del Cacao. Quinta edición, pp. 21-23.
- Ríos, F., Ruiz, A., Lecaro, J., y Rehpani, C. (2017). Estrategias país para la oferta de cacaos especiales -Políticas e iniciativas privadas exitosas en el Perú, Ecuador, Colombia y República Dominicana. Fundación Swisscontact Colombia. Bogotá D. C.
- Rojas-Rojas, K., Hernández-Aguirre, C., Mencía-Guevara, A. (2021). Transformaciones bioquímicas del cacao (*Theobroma cacao* L.) durante un proceso de fermentación controlada. *Agronomía Costarricense*, 45(1), 53-65. <https://doi.org/10.15517/rac.v45i1.45694>
- Rodríguez-Medina, C., Arana, A. C., Sounigo, O., Argout, X., Alvarado, G. A., & Yockteng, R. (2019). Cacao breeding in Colombia, past, present and future. *Breeding Science*, 69(3), 373-382. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.19011>
- Romero, C., & Urrego, E. (2016). Estudio del cacao en el Perú y en el Mundo. Ministerio de Agricultura y Riego.
- Rosales-Valdívía, B. S., García-Curiel, L., Pérez-Flores, J. G., Contreras-López, E., Pérez-Escalante, E., & García-Mora, C. (2024). Influencia de la fermentación del cacao y del uso de cultivos iniciadores sobre las características organolépticas del chocolate: un análisis integral. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 12(23), 31–43. <https://doi.org/https://doi.org/10.29057/icbi.v12i23.12047>
- Penagos, M. (2019). *Estandarización del proceso de fermentación de cacao (Theobroma cacao L.) en función de la relación entre la masa de grano y el volumen del cajón fermentador* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76069>
- Quevedo, J., Romero, J., Tuz, I. (2018). Calidad físico, químico y sensorial de granos y licor de cacao (*Theobroma Cacaol.*) Usando cinco métodos de fermentación. *Revista Científica Agroecosistemas*, 6(1), 115–127.



- Ramos, J. (2016). Defining Competitiveness in the Philippines' Cacao Industry. Organization for Partnerships, Teamwork and Initiatives on Opportunities for Nature Stewards, Inc. Presented at the Industry Roadmaps and AEC Gameplan, 12 May. Philippines: Tuguegarao City
- Rojas-Rojas, K., Hernández-Aguirre, C., Mencía-Guevara, A. (2021). Transformaciones bioquímicas del cacao (*Theobroma cacao* L.) durante un proceso de fermentación controlada. *Agronomía Costarricense*, 45(1), 53-65.
- Rosales-Valdívia, B. S., García-Curiel, L., Pérez-Flores, J. G., Contreras-López, E., Pérez-Escalante, E., & García-Mora, C. (2024). Influencia de la fermentación del cacao y del uso de cultivos iniciadores sobre las características organolépticas del chocolate: un análisis integral. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 12(23), 31-43. <https://doi.org/https://doi.org/10.29057/icbi.v12i23.12047>
- Santander Muñoz, M., Rodríguez Cortina, J., Vaillant, F. E., & Escobar Parra, S. (2020). An overview of the physical and biochemical transformation of cocoa seeds to beans and to chocolate: Flavor formation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(10), 1593-1613. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1581726>
- Schwan, R. F., & Wheals, A. E. (2004). The Microbiology of Cocoa Fermentation and its Role in Chocolate Quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44(4), 205-221. <https://doi.org/10.1080/10408690490464104>
- Swisscontact. (2014). Desarrollo de la cadena de valor del cacao: Folleto Cacao Recuperado de: https://www.swisscontact.org/fileadmin/user_upload/HEAD_OFFICE/Documents/Topics_Brochures/Folleto_Cacao.pdf
- Teneda, W. (2016). Mejoramiento del proceso de fermentación del cacao (*Theobroma cacao* L.). *Universidad Internacional de Andalucía*. 138 pág. <http://hdl.handle.net/10334/3743>
- Tigrero-Vaca, J., Maridueña-Zavala, M. G., Liao, H.-L., Prado-Lince, M., Zambrano-Vera, C. S., Monserrate-Maggi, B., & Cevallos-Cevallos, J. M. (2022). Microbial Diversity and Contribution to the Formation of Volatile Compounds during Fine-Flavor Cacao Bean Fermentation. *Foods*, 11(7), 915. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/foods11070915>
- Thompson, S. S., Miller, K. B., Lopez, A. S., & Camu, N. (2012). Cocoa and Coffee. In M. Doyle & R. Buchanan (Eds.), *Food Microbiology* (pp. 881-899). ASM Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1128/9781555818463.ch35>



- Tchouatcheu, G. A. N., Noah, A. M., Lieberei, R., & Niemenak, N. (2019). Effect of cacao bean quality grade on cacao quality evaluation by cut test and correlations with free amino acids and polyphenols profiles. *Journal of Food Science and Technology*, 56(5). [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13197-019-03749-y](https://doi.org/10.1007/s13197-019-03749-y)
- Tornés, J. (2013). Cacao, una aportación de México al mundo. *Revista Ciencia*, 66(3), 1–8. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/66_3/PDF/Cacao.pdf
- Urbańska, B., Kowalska, H., Szulc, K., Ziarno, M., & Pochitskaya, I. (2021). Comparison of the effects of conching parameters on the contents of three dominant flavan-3-ols, rheological properties and sensory quality in chocolate milk mass based on liquor from unroasted cocoa beans. *Molecules*, 26(9), 2502. <https://doi.org/10.3390/molecules26092502>
- Vélez, L. S., Carreño, L. V., Quiñónez, L. C., Mora, F. D. S., Macías, C. S., & Monserrate, G. P. (2022). Recursos genéticos de cacao tipo Nacional en Ecuador: una revisión sistemática. *Revista Ciencia y Tecnología*, 15(2), 31-44. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8791928>
- Viesser, J. A., de Melo Pereira, G. V., de Carvalho Neto, D. P., Favero, G. R., de Carvalho, J. C., Goés-Neto, A., Roges, H., Soccol, C. R. (2021). Global cocoa fermentation microbiome: revealing new taxa and microbial functions by next generation sequencing technologies. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03079-2>
- Wood, G.A.R., and Lass, R.A. (2008). *Cocoa*. 4th Edition. John Wiley & Sons, Oxford



Mejoramiento de la fotosíntesis en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en el bosque seco tropical mediante fuentes orgánicas e inorgánicas: un análisis sobre el intercambio gaseoso, partición de biomasa y rendimiento.

Improvement of photosynthesis in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in the tropical dry forest through organic and inorganic sources: an analysis on gas exchange, biomass partitioning and yield.

Jhon Eduar Noriega Ortega¹, Jairo Polanía Reyes¹,
Karen Natalia Asencio Otalora¹

¹ Centro de Formación Agroindustrial, SENA, jhnoriega@sena.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-1055-1159>

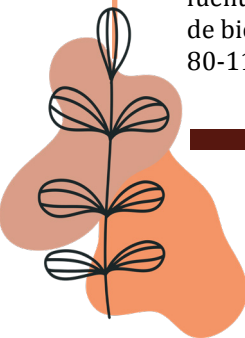
¹ Centro de Formación Agroindustrial, SENA, japolania@sena.edu.co, <https://orcid.org/0009-0009-1184-6435>

¹ Centro de Formación Agroindustrial, SENA, kasencio@sena.edu.co, <https://orcid.org/0009-0000-7479-3574>

Autor para correspondencia: jhnoriega@sena.edu.co

Como citar:

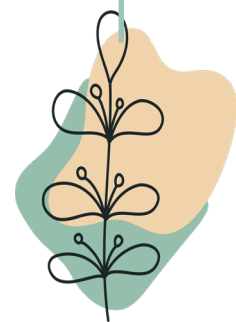
Noriega Ortega, J. E., Polanía Reyes, J., y Asencio Otálora, K. N. (2024). Mejoramiento de la fotosíntesis en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en el bosque seco tropical mediante fuentes orgánicas e inorgánicas: un análisis sobre el intercambio gaseoso, partición de biomasa y rendimiento. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*, 11(1), 80-111.



Resumen

La aplicación conjunta de fertilizantes orgánicos e inorgánicos puede mejorar la capacidad del suelo para liberar nutrientes esenciales en formas fácilmente asimilables, de manera gradual y sostenida, mejorando la sostenibilidad y la eficiencia de los sistemas agrícolas. La implementación de esta tecnología en leguminosas como el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en condiciones de bosque seco tropical ha sido poco explorada. El objetivo de este estudio es la evaluación del intercambio gaseoso, partición de biomasa y rendimiento de frijol como respuesta a la aplicación de fuentes orgánicas e inorgánicas. El experimento se realizó con frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), variedad calima, sembrado en un suelo con bajo contenido de materia orgánica y baja disponibilidad de nutrientes. Se aplicaron cuatro tratamientos de fertilización: fertilización inorgánica (INF), fertilización orgánico mineral 1 (OFCC), fertilización orgánico mineral 2 (OFCF) y un control sin fertilización (SNF). El perfil climatológico mostró que las altas temperaturas diurnas y las escasas precipitaciones son un riesgo para la producción. Los resultados revelaron que la fertilización que incluyó fuentes orgánicas, redujo ciertos factores fisiológicos del frijol comparado con INF, como la conductancia estomática (g_s) y el uso eficiente de agua (WUE_p) sin generar impactos significativos en la fotosíntesis neta (P_n). El aumento en la producción de grano con el tratamiento OFCF, se relacionó con la habilidad de la planta para optimizar su capacidad fotosintética, gracias al suministro más prolongado de NPK y utilizando un mecanismo fisiológico basado en ahorrar agua en el suelo y disipar el efecto negativo de la temperatura del aire. Este estudio validó, en condiciones de campo, los beneficios de combinar fertilizantes orgánicos e inorgánicos en la producción de frijol común en condiciones de bosque seco tropical.

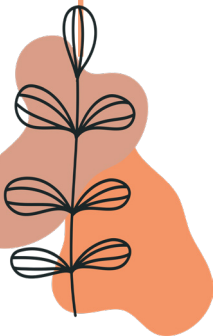
Palabras clave: frijol común, insumos orgánicos, fertilizante inorgánico, estrés abiótico, fotosíntesis, uso eficiente de agua, crecimiento y rendimiento.



Abstract

The combined application of organic and inorganic fertilizers can enhance the soil's ability to gradually and sustainably release essential nutrients in easily assimilable forms, thereby improving the sustainability and efficiency of agricultural systems. The implementation of this technology in legumes critical for human nutrition, such as common beans, in dry tropical forest conditions has been insufficiently explored. The objective of this study was to evaluate gas exchange, biomass partitioning, and the yield of beans in response to the application of organic and inorganic sources. The experiment was conducted using common bean variety Calima, planted in soil with low organic matter content and limited nutrient availability. Four fertilization treatments were applied: inorganic fertilization (INF), organic-mineral fertilization 1 (OFCC), organic-mineral fertilization 2 (OFCF), and a control with no fertilization (SNF). The climatic profile indicated that high daytime temperatures and scarce precipitation pose risks to production. Results revealed that the inclusion of organic sources in fertilization reduced certain physiological factors of the beans compared to the INF treatment, such as stomatal conductance (g_s) and water use efficiency (WUE_e), without significantly impacting net photosynthesis (P_n). The increase in grain yield observed with the OFCF treatment was related to the plant's ability to optimize its photosynthetic capacity due to a more prolonged supply of NPK, along with a physiological mechanism focused on water conservation in the soil and mitigating the negative effects of air temperature. This study validated, under field conditions, the benefits of combining organic and inorganic fertilizers for the production of common beans in dry tropical forest environments.

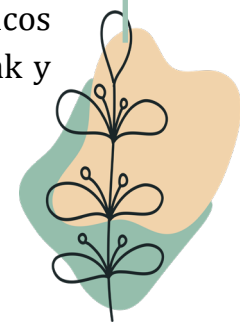
Keywords: common bean; organic inputs; inorganic fertilizer; abiotic stress; photosynthesis; water use efficiency; growth and yield.



Introducción

Las leguminosas constituyen la principal fuente de proteínas y nutrientes esenciales y accesibles para la población en las regiones de mayor pobreza a nivel mundial (Iqbal et al., 2006; Ríos-Castillo et al., 2018; Velázquez et al., 2010). En América Latina, la leguminosa de mayor importancia en la alimentación de las personas es el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) y la mayor parte de la producción proviene de pequeños agricultores (Andrade et al., 2016; Suárez et al., 2021, 2022a). En Colombia, en el año 2023, se sembraron 78.184 hectáreas que produjeron 95.510 toneladas de frijol, con rendimiento promedio de frijol arbustivo de 930 kg ha⁻¹. El departamento del Huila con un área sembrada de 11.800 hectáreas y una producción de 16.520 toneladas, que equivalen al 17,2% de la producción nacional, lo posicionan como el principal productor del país. Sin embargo, estos datos son 26,4% menores en área sembrada y 3,4% en producción, comparados con el año 2020 (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas FENALCE, 2023). Esta disminución en la producción se puede atribuir a factores agroecológicos y a la falta de acceso a tecnología relacionada con el uso adecuado de fertilizantes (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, 2018; Lafitte, 1994).

A pesar del importante papel en los sistemas agroalimentarios en los trópicos, la producción de frijol común se ha visto afectada por el estrés abiótico relacionado con altas temperaturas, baja disponibilidad de agua (Beebe et al., 2013; Godfray et al., 2010; Massawe et al., 2016; Polania et al., 2016) y baja fertilidad del suelo (Guo et al., 2002; Suárez et al., 2018). A nivel de suelo, el frijol común requiere que los nutrientes se encuentren fácilmente disponibles (Guimarães et al., 2017), por lo tanto, se puede determinar que es un cultivo sensible a suelos de baja fertilidad (Nascente et al., 2017). A nivel de planta se reporta menor fijación simbiótica de nitrógeno (Araújo et al., 2015), disminución de la actividad fotosintética y el intercambio de gases con el medio ambiente al reducir el área foliar, cerrar sus estomas y aumentar la asignación de fotoasimilados en hojas y sistema radicular (Chtouki et al., 2022; Hermans et al., 2006; Rao et al., 2016), que se traduce en menor rendimiento de grano (Beebe et al., 2014; Singh et al., 2003). En las regiones tropicales, la baja fertilidad del suelo es un problema constante en la producción de frijol (Janick, 2012). En consecuencia, se han realizado esfuerzos para desarrollar estrategias tecnológicas que mitiguen ese efecto negativo. Una de estas estrategias es la aplicación conjunta de fertilizantes orgánicos e inorgánicos para la producción (Ahmadi y Arain, 2021; S. Beebe, 2012; Sitinjak y Purba, 2018; Suárez et al., 2022a; Tang et al., 2019).



Se ha demostrado que los fertilizantes inorgánicos proporcionan fracciones de Nitrógeno, Fósforo y Potasio (NPK) fácilmente asimilables, mejorando el crecimiento de las plantas de frijol y como consecuencia, rendimientos más estables, debido a la mejora de la entrada de carbono y su capacidad para convertir energía solar en biomasa (Abera et al., 2005; Mäder et al., 2002). Asimismo, la incorporación de materia orgánica optimiza la capacidad de retención de agua y fertilidad del suelo (Baghdadi et al., 2018; Liu et al., 2010), promueve una mayor actividad fotosintética y conductancia estomática eficiente, mejorando el rendimiento de biomasa (Bunce, 2006; Clarkson, 1996). Esto indica, que el uso de fertilizantes orgánicos combinados con fertilizantes inorgánicos, proporciona nutrientes esenciales de manera gradual y sostenida, mejorando la relación entre la fotosíntesis y la transpiración y, por lo tanto, un aumento en el uso eficiente de agua (Gai et al., 2017; Moraga Quezada, 2021; Savala et al., 2021) lo que conduce a un mayor rendimiento del grano (Silva et al., 2024).

Ante este panorama, el mayor desafío para investigadores y agricultores, es encontrar la combinación correcta de la fertilización con fuentes orgánicas e inorgánicas como práctica agronómica para mejorar el crecimiento y rendimiento de frijol en ecosistemas de bosque seco tropical en el norte del departamento del Huila, zona que se caracteriza principalmente por suelos de baja fertilidad (Chávarro et al., 2017; Saavedra-Mora et al., 2019) y altas temperaturas del aire (Mora et al., 2017; Suárez et al., 2020). Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es la evaluación del efecto de la fertilización con fuentes orgánicas e inorgánicas sobre el intercambio gaseoso, partición de biomasa y rendimiento en el bosque seco tropical.

Materiales y métodos

Descripción del sitio experimental

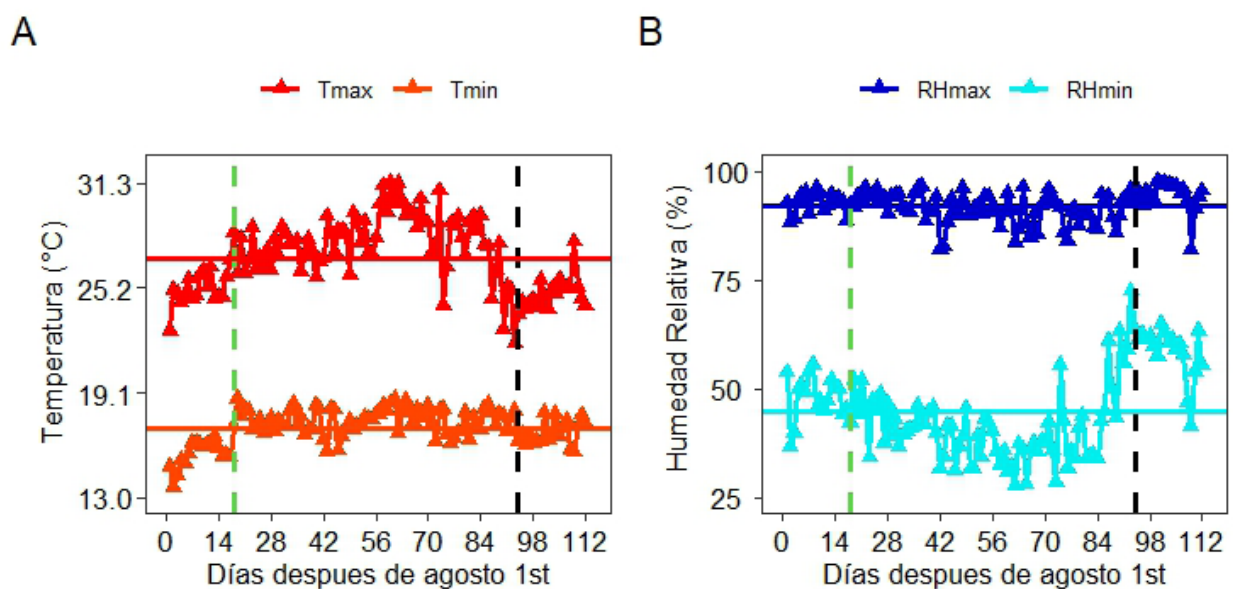
El presente estudio se realizó en el Centro de Formación Agroindustrial La Angostura SENA, localizado en municipio de Campoalegre, Huila (latitud: 2° 36' 55" N, longitud: 75° 21' 33" O), kilómetro 38 al sur de Neiva. La zona de estudio se encuentra a 600 msnm, con temperatura promedio de 26,5°C, (Chávarro et al., 2022). Humedad relativa de 27%-99% y precipitación anual de 1300-1800 mm (Saavedra et al., 2018). Pertenecce a la zona de vida del bosque seco tropical (bs-T) (Holdridge et al., 1967). Durante el periodo de estudio, los valores medios de humedad relativa máxima y mínima oscilaron entre 92% y 44,94%, respectivamente, acompañados de una



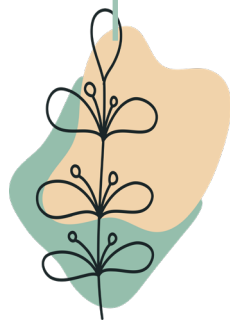
precipitación acumulada de 237,5 mm, 32% menos que el mínimo requerido para el frijol (Chavarria et al., 2020; Salcedo, 2018). El rango óptimo de temperatura para el crecimiento del frijol oscila entre 17,5°C y 23,1°C (Beebe, 2012; Beebe et al., 2011). En nuestro estudio las temperaturas máximas y mínimas superaron el valor medio de 26,95°C y 17,06°C, respectivamente, alcanzando valores por encima de los 30°C. Estos valores indican que el clima del bosque seco tropical es un factor limitante en la producción de frijol.

Figura 1.

Distribución de: A) Temperaturas máximas/mínimas. B) Humedad relativa máximas/mínimas durante el período de crecimiento del cultivo en condiciones del Centro de Formación Agroindustrial (2023). Las líneas roja y naranja muestran el promedio de la temperatura máxima y mínima del aire, respectivamente: Tmax: 26,95°C, Tmin: 17,06°C. Las líneas azul oscuro y azul claro muestran el promedio de la humedad relativa máxima y mínima del aire, respectivamente: RHmax: 92,0%, RHmin: 44,94% y la línea verde y negra discontinua indica el inicio y final del periodo de evaluación.



Nota. Elaboración propia.



El experimento se realizó en un terreno de 330 m², donde anteriormente se producía maíz (con baja productividad, 5 ton ha⁻¹). El suelo corresponde a la clase textural franco y pH ligeramente ácido, bajo contenido de materia orgánica, N, K, S, Na y Fe para el cultivo de frijol, contenidos de P, Ma, Ca, Mn y Zn no adecuados para frijol, y textura y pH ideal para su cultivo.

Tabla 1.

Propiedades fisicoquímicas del suelo del sitio experimental.

Parámetro	Valor	Unidad
Textura	Franco	% (g/100g)
pH	6,27	Unidades de pH
CIC	11,91	cmol(+)/kg
Carbono orgánico	0,42	% (g COT/100 g suelo)
Materia Orgánica	0,72	% (g MO/100 g suelo)
Nitrógeno Total	0,03	% (g N/100 g suelo)
Conductividad eléctrica	0,307	dS/m
Sodio	0,07	cmol(+)/kg
Potasio	0,22	cmol(+)/kg
Calcio	8,65	cmol(+)/kg
Magnesio	2,98	cmol(+)/kg
Manganeso	58,26	mg/kg
Zinc	10,91	mg/kg
Cobre	2,5	mg/kg
Fósforo disponible	91,12	mg/kg

Nota. Elaboración propia

El área experimental se preparó mediante desbrozadora y pasadas con arado de rastra y rastrillo. A los 20 días se aplicaron cuatro tratamientos de fertilización con tres repeticiones. Se utilizaron los siguientes tratamientos: fertilización inorgánica (INF), fertilización orgánico mineral 1 (OFCC), fertilización orgánico mineral 2 (OFCF) y un control sin fertilización (SNF) (**Tabla 2**). Los tratamientos se realizaron en 12 parcelas de 3×6 m, utilizando un esquema completamente al azar. El material utilizado fue frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) variedad calima, con densidad de siembra de 117.206 plantas ha⁻¹, distribuidas en surcos de 0,6 m de ancho y 0,14 m entre plantas. El experimento tuvo una duración de 76 días (18 de agosto de 2023 - 02 de noviembre de 2023).



Tabla 2.

Tratamientos utilizados en términos de cantidad por producto aplicado (Kg ha⁻¹).

Tratamiento	Productos (Kg ha ⁻¹)			
	Fertilizante orgánico 1	Fertilizante orgánico 2	15-15-15	17-6-18-2
INF	-	-	300	150
OFCC	3500	-	150	75
OFCF	-	3500	150	75
SNF	-	-	-	-

Nota. Elaboración propia

La aplicación de los fertilizantes orgánicos se realizó ocho días antes de la siembra y los inorgánicos, en dos aplicaciones, en el momento de la siembra y 15 días después. Los fertilizantes utilizados fueron:

- Producción 17-6-18-2®, Nutrimon, Monómeros Colombo Venezolanos S.A., con los siguientes elementos en la proporción de N:P:K:Mg:S igual a 17:6:18:2:2 (relación N-NH₄, N-NO₃ = 61:39; fuente de P-P₂O₅; fuente de K-K₂O).
- 15-15-15®, Nutrimón, Monómeros Colombo Venezolanos S.A., con los siguientes elementos en la proporción de N:P:K igual a 15:15:15 (relación N-NH₄, N-NO₃ = 69:31; fuente de P-P₂O₅ fuente de K-K₂O).
- Fertilizante orgánico 1, derivado del compost de cacota de cacao, restos de poda de cacao, estiércol bovino y bagazo de caña, la formulación contiene los residuos orgánicos en la proporción porcentual igual a 47:31:20:2 (Noriega et al., 2023). Las características fisicoquímicas del fertilizante se muestran en la Tabla 3.
- Fertilizante orgánico 2, derivado del compost de pulpa de café, estiércol bovino, aserrín y bagazo de caña, la formulación contiene los residuos orgánicos en la proporción porcentual igual a 70:25:2.5:2.5 (Noriega et al., 2023). Las características fisicoquímicas del fertilizante se muestran en la Tabla 3.

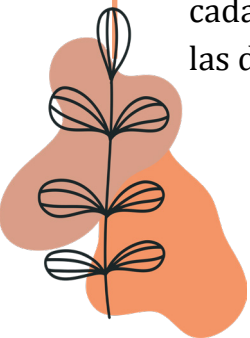


Tabla 3.*Propiedades fisicoquímicas de los fertilizantes orgánicos.*

Parámetro	Fertilizante orgánico 1 (cacao)	Fertilizante orgánico 2 (café)	Unidad
Humedad	7,68 ± 0,54	7,56 ± 0,32	% (g/100g)
pH	7,9 ± 0,17	9,0 ± 0,19	Unidades de pH
CIC	>19,5	>19,5	cmol(+)/kg
Carbono orgánico total	15,2 ± 1,47	10,1 ± 0,98	% (g COT/100 g)
Materia Orgánica	26,2	17,4	% (g MO/100 g)
Nitrógeno Total	1,31	0,87	% (g N/100 g)
R. Carbono/Nitrógeno	11,6	11,6	-
Conductividad eléctrica	2,28	5,49	dS/m
Sodio	0,45	0,48	cmol(+)/kg
Potasio	15,8	45,6	cmol(+)/kg
Calcio	12,6	7,76	cmol(+)/kg
Magnesio	6,22	2,51	cmol(+)/kg
Manganeso	8,29	4,07	mg/kg
Zinc	1,93	2,70	mg/kg
Cobre	0,08	1,53	mg/kg
Fósforo disponible	20,4	15,2	mg/kg

Nota. Tomado de Noriega et al (2023)

El control de arvenses (ciperáceas y gramíneas) se realizó con la aplicación del herbicida *Basagran 480* a los 10 y 35 días después de la siembra (dds), el control preventivo de insectos plaga y enfermedades fúngicas con la aplicación del producto biológico *SAFER MIX* y caldo bordelés respectivamente, con frecuencias de aplicación cada 12 días después de la siembra. Todos los productos se emplearon de acuerdo con las dosis recomendadas.



Parámetros de intercambio gaseoso en hojas de frijol común

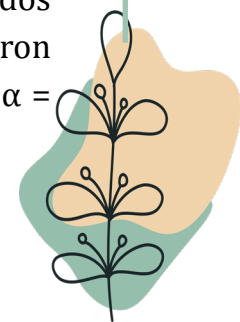
El análisis fisiológico se realizó durante la floración (BBCH 65), etapa donde la planta expresa su máximo potencial de asimilación de CO_2 a través de la fotosíntesis (Smith et al., 2022; Suárez et al., 2022b), se tomó el foliolo central de la hoja 3 contada desde del meristemo apical, la cual se encontraba completamente extendida, madura y expuesta. Las medidas de intercambio gaseoso se realizaron usando el analizador de gases infrarrojo *CI-340 Handheld Photosynthesis System* (CID Bio-Science, Inc. Camas, WA, Estados Unidos), a una temperatura de 25°C , con concentraciones de CO_2 en sistema abierto y siguiendo lo establecido por Zou et al (2020). La tasa de fotosíntesis neta (P_n) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), tasa de transpiración (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), conductancia estomática (g_s) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentración subestomática de CO_2 (C_i) (mol mol^{-1}) y el uso eficiente de agua (WUE_e) ($\mu\text{mol mol}^{-1}$) se midieron entre las 07:00 y las 9:00 horas. El valor de limitación estomática (g_{lim}) se calculó utilizando la siguiente fórmula: $g_{\text{lim}} = 1 - (C_i / C_a)$, según Yin et al (2006). Con la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura de la hoja (medida por el Sistema de Fotosíntesis Portátil CI-340) calculamos el diferencial de temperatura foliar (LTD) ($^\circ\text{C}$).

Índices de partición de biomasa y rendimiento del grano en frijol común

Durante la fase de llenado de vainas (BBCH 75) se tomaron cuatro plantas al azar por cada unidad experimental ($n=12$), de cada planta se obtuvieron los pesos de la materia seca (g) la raíz (RoW), el tallo (StW), la hoja (LeW), la vaina (PoW), y en el momento de la cosecha (BBCH 89), la producción de granos por planta (RG), el peso total de las vainas por planta (WPP) y el peso de la biomasa del dosel (CB) (Suárez et al., 2022a). A partir de este pesaje se calculó el índice de partición de biomasa del dosel (CB) y el índice de cosecha (HI) (Beebe et al., 2013; Suárez et al., 2022a).

Análisis Estadístico

Para observar el efecto de cada tipo de fertilización sobre el intercambio de gases de la hoja, materia seca, rendimiento de grano, e índices de partición de la materia seca, se realizó una tabla resumen de las variables medidas utilizando los resultados del análisis de varianza y las diferencias entre los tipos de fertilización, se analizaron mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey con una significación de $\alpha =$



0,05. Todos los análisis se realizaron utilizando el software estadístico R (v4.4.1; R Core Team 2024), los paquetes de R dplyr (v1.1.4; Wickham et al., 2023), multcompViewm (v0.1.10; Graves et al., 2024) y las salidas gráficas a través del paquete ggplot2 (v3.5.1; Wickham 2016).

Resultados

Se resumieron las características climáticas de la principal temporada de cultivo en Campoalegre para los años 1992-2023 (**Figura 2**). La temporada de crecimiento se caracteriza por valores más altos de temperaturas máximas, valores más bajos de temperaturas mínimas y escasas precipitaciones en los primeros 50 días de la temporada. La humedad relativa es moderada en este ambiente de bosque seco tropical y cuando se combina con altas velocidades del viento, conduce a valores altos de VPD durante la mayor parte de la temporada. Se cree que las temperaturas máximas diarias medias superiores a 30°C reducen la producción de frijol (Porch et al., 2010; Suárez et al., 2021). Entre los años 1992 y 2023, aproximadamente el 42% de las temporadas de crecimiento experimentaron al menos 1 día en el que las temperaturas máximas diarias superaron los 30°C.

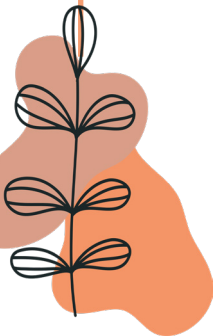
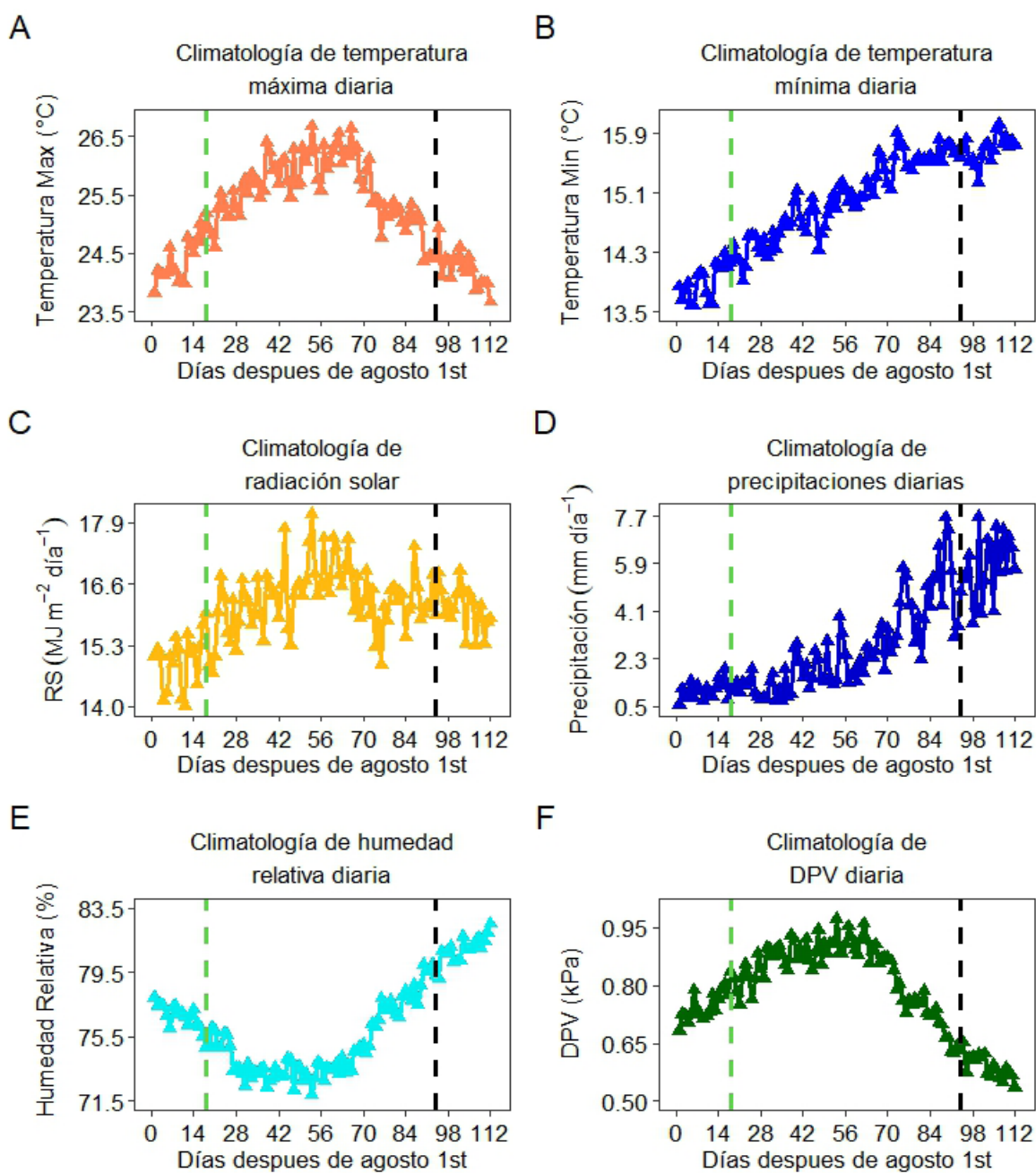
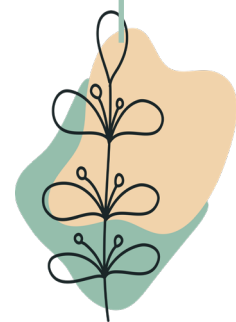


Figura 2.

Características climáticas de la principal temporada de cultivo en Campoalegre para los años 1992-2023. **(A)** Temperatura máxima diaria ($^{\circ}\text{C}$), **(B)** temperatura mínima diaria ($^{\circ}\text{C}$), **(C)** radiación solar diaria ($\text{MJm}^{-2} \text{ día}^{-1}$), **(D)** precipitación diaria (mm día^{-1}), **(E)** humedad relativa (%), **(F)** déficit diario de presión de vapor (kPa).



Nota. Elaboración propia



Ajustes en el intercambio gaseoso del frijol común cultivado bajo diferentes tipos de fertilización

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en la tasa de fotosíntesis neta (P_n) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), la conductancia estomática (g_s) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), la concentración subestomática de CO_2 (C_i) (mol mol^{-1}), la limitación estomática (g_{lim}), el diferencial de temperatura foliar (LTD) ($^{\circ}\text{C}$) y el uso eficiente de agua (WUE_e) ($\mu\text{mol mol}^{-1}$) en plantas de frijol sin fertilización (SNF) comparado con la fertilización inorgánica (INF) y la fertilización orgánico mineral (OFCC, OFCF), a excepción de la tasa de transpiración (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), presentado un valor de p mayor a 0,05.

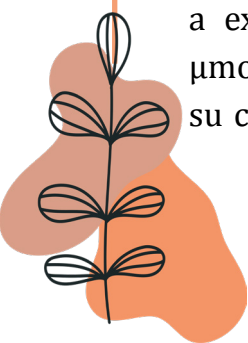
Tabla 4.

Variables fisiológicas en frijol común cultivado bajo diferentes tratamientos de fertilización.

Variable	INF				OFCC				OFCF				SNF				Valor de P	
	Media		D.E.		Media		D.E.		Media		D.E.		Media		D.E.			
P_n	19	±	2,7	a	16,8	±	2,23	a	14,9	±	4,05	a	4,57	±	0,95	b	0,000851 ***	
E	11	±	1,4	a	10,5	±	0,66	ab	10,6	±	11	b	9,06	±	0,17	b	0,0546	
g_s	306	±	22	a	228	±	33,8	b	234	±	22,6	b	188	±	12,3	b	0,00218 **	
C_i	296	±	7,7	b	287	±	50,1	a	323	±	47,1	ab	420	±	22,4	a	0,00868 **	
WUE_e	1,7	±	0,1	a	1,61	±	0,25	a	1,42	±	0,4	a	0,50	±	0,15	b	0,00254 **	
g_{lim}	0,4	±	0,02	a	0,35	±	0,07	a	0,22	±	0,04	b	0,1	±	0,03	c	0,000125 ***	
LTD	-2	±	0,7	c	3,29	±	1,0	a	0,19	±	0,4	b	0,73	±	0,36	b	8,79e-05 ***	

Fertilización inorgánica (INF), fertilización orgánico mineral 1 (OFCC), fertilización orgánico mineral 2 (OFCF) y el control sin fertilización (SNF). Media ± desviación estándar. a, b, c: Los promedios con una letra en común entre filas no son significativamente diferentes con un 5% de probabilidad. *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$.

La mayor tasa de fotosíntesis neta (P_n) se observó por el tratamiento INF con $19,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ seguido por los tratamientos OFCC y OFCF, que presentan tasas de $16,8$ y $14,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ respectivamente, sin embargo, estas diferencias no son significativas, a excepción de SNF, donde la tasa fotosintética disminuye drásticamente a $4,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Es decir que las plantas de frijol sin fertilización reducen el 76,3% de su capacidad para asimilar el CO_2 atmosférico comparado con INF, y entre 73,3% y



69.8% con OFCC y OFCF respectivamente (**Tabla 4**). La conductancia estomática (g_s) mostró una tendencia similar a P_n . El tratamiento INF presenta el valor más alto ($305 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), mientras que la fertilización orgánico mineral (OFCF, OFCC) presenta disminuciones de g_s en el orden de 23,6 % a 25,5 % y el tratamiento SNF muestra la mayor disminución de g_s (38%) (**Figura 1b**), además, del valor más alto en la concentración interna de CO_2 (C_i) ($419,5 \text{ mol mol}^{-1}$), seguido por los tratamientos OFCF, INF y OFCC con disminuciones del 23%, 29,5% y 31,4% respectivamente, evidenciándose un comportamiento de C_i contrario al de P_n , menor concentraciones de C_i en tratamientos de mayor P_n (**Tabla 4**).

La eficiencia en el uso del agua (WUE_e) refleja un patrón similar a P_n y g_s , el mayor valor se observa en el tratamiento INF ($1,66 \text{ } \mu\text{mol mol}^{-1}$), disminuyendo 2,94% con OFCC y 14,73% con OFCF. En contraste, el tratamiento sin fertilizante presenta un WUE_e mucho menor ($0,50 \text{ } \mu\text{mol mol}^{-1}$), equivalente a reducciones del 69,8% comparado con INF (**Tabla 2**). El diferencial de temperatura foliar (LTD) fue negativo con el tratamiento INF (-2°C) y positivo en OFCC ($3,29^\circ\text{C}$), mientras que en los tratamientos OFCF y SNF los valores fueron cercanos a cero $0,19^\circ\text{C}$ y $0,73^\circ\text{C}$ respectivamente. En cuanto a la limitación estomática (g_{lim}), el mayor valor lo presentó INF (0,4), el menor SNF (0,1) y valores intermedios con fertilización orgánico mineral (OFCC, OFCF) (**Tabla 4**).

Movilización de fotosintatos: Cambios en la biomasa del dosel y raíz, partición de biomasa y rendimiento de grano

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en la biomasa de raíz (RoW) (g planta^{-1}), biomasa del dosel (CB) (g planta^{-1}), producción de grano (RG) e índice de cosecha (HI) (%) en plantas de frijol sin fertilización (SNF) comparado con la fertilización inorgánica (INF) y la fertilización orgánico mineral (OFCC, OFCF) (**Tabla 3**). Los valores de biomasa de raíz (RoW) entre los tratamientos con fertilización orgánico mineral OFCF y OFCC presentaron variaciones no significativas ($2,569$ y $2,365 \text{ g planta}^{-1}$) respectivamente. Sin embargo, en los tratamientos (INF: $1,337 \text{ g planta}^{-1}$; SNF: $0,783 \text{ g planta}^{-1}$) los valores de RoW son significativamente diferentes con respecto a los tratamientos con fertilización orgánico mineral, aun así, estos últimos no son significativamente diferentes entre sí (**Tabla 5**).

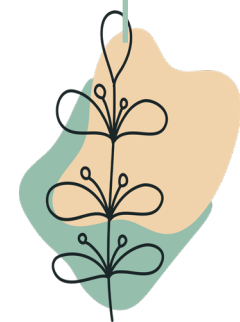


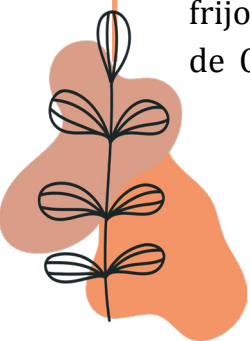
Tabla 5.

Materia seca, producción de grano, e índices de partición de la materia seca en frijol común cultivado bajo diferentes tratamientos de fertilización.

Variable	INF				OFCC				OFCF				SNF				Valor de P	
	Media		D.E.		Media		D.E.		Media		D.E.		Media		D.E.			
RoW	1,3	±	0,3	ab	2,37	±	0,98	a	2,57	±	0,26	a	0,78	±	0,03	b	0,0104 *	
CB	26	±	5,0	a	21,1	±	2,88	ab	25,5	±	4,77	a	13,5	±	1,22	b	0,0131 *	
HI	41	±	3,4	a	24,3	±	4,21	b	37,2	±	4,88	a	20,2	±	4,05	b	0,000816***	
RG	6,2	±	2,4	ab	5,32	±	1,12	ab	8,24	±	1,31	ab	2,35	±	0,53	b	0,00895**	

Fertilización inorgánica (INF), fertilización orgánico mineral 1 (OFCC), fertilización orgánico mineral 2 (OFCF) y el control sin fertilización (SNF). Media $\pm$ desviación estándar. a, b, c: Los promedios con una letra en común entre filas no son significativamente diferentes con un 5% de probabilidad. *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$.

El mayor valor en la biomasa del dosel (CB), se observó en el tratamiento INF con 25,8 g planta⁻¹ seguido el tratamiento OFCF con 25,5 g planta⁻¹ y OFCC con 21 g planta⁻¹ sin embargo, estas diferencias no son significativas, a excepción de SNF, donde CB disminuye drásticamente a 13,5 g planta⁻¹. Es decir, que las plantas de frijol sin ningún tipo de fertilización reducen entre el 35% y 47% del crecimiento y desarrollo de la parte aérea (**Tabla 5**). En términos de movilización de fotosintatos para la producción de grano, se encontró un efecto positivo bajo la aplicación de los tratamientos INF y OFCF en comparación con OFCC y SNF. Sin embargo, INF fue más eficiente un 8,3% en comparación con OFCF. INF alcanzó valores de índice de cosecha (HI) de 40,59% y 37,21% con la aplicación de OFCF. Esto es diferente a lo observado con la aplicación de OFCC y SNF donde el valor de HI fue alrededor del 24,35% y 20,16%, respectivamente (**Tabla 5**). En la producción de grano (RG), observamos que el tratamiento OFCF mostró el rendimiento más alto con un promedio de 8,24 g planta⁻¹, seguido por INF con 6,22 g planta⁻¹, revelando que con el tratamiento OFCF se produce 236,7 kg ha⁻¹ más que con el tratamiento INF y 35,7 kg ha⁻¹ por encima del promedio nacional de frijol arbustivo que corresponde a 930 kg ha⁻¹ (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas FENALCE, 2023). Contrario a lo observado con OFCC,



disminuye el 35% con respecto a OFCF y el 14% con INF. En contraste, el tratamiento sin fertilizante presenta RG mucho menor ($2,34 \text{ g planta}^{-1}$), equivalente a reducciones entre el 55% y 72% (Tabla 5).

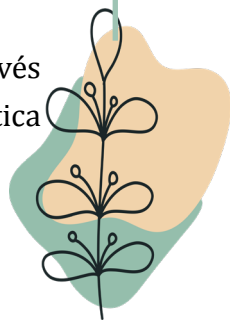
Discusión

La eficiencia fotosintética en frijol común mejora cuando se combinan fertilizantes orgánicos e inorgánicos en condiciones de altas temperaturas

En frijol común, la eficiencia fotosintética disminuye por encima de un umbral de 30°C como resultado de una reducción en el estado de activación de Rubisco (Sage et al., 2008; Wahid et al., 2007). Esto limita la fijación de carbono y, posteriormente la fotosíntesis neta (Deva et al., 2020).

La alta temperatura causa efectos negativos durante el período reproductivo desde el inicio de la floración hasta el llenado de las semillas (Araújo et al., 2015; Vargas et al., 2021). En nuestro estudio, el 26,6% de las observaciones de la temperatura del aire desde el inicio de la floración, fueron superiores a 30°C ., deduciendo que las condiciones climáticas del bosque seco tropical, suscitan un desbalance entre la fotosíntesis y la transpiración en el frijol cuando no se emplea la fertilización (SNF); es decir, la tasa de asimilación de CO_2 (P_n) disminuye, mientras que la tasa de transpiración (E) se incrementa (Bramley et al., 2013; Wahid, 2007), debido a la reducción de la conductancia estomática (g_s) que podría haber resultado del cierre de los estomas que impide la entrada de CO_2 en la hoja, la asimilación del carbono fotosintético disminuye en favor de la fotorrespiración (Mathobo et al., 2017; Rosales et al., 2012). Sharkey y Seemann, (1989) reportaron una disminución en las tasas fotosintéticas del frijol debido al cierre de los estomas. Tang et al (2002) demostraron que existe una combinación de efectos estomáticos y no estomáticos sobre la fotosíntesis, dependiendo del grado de estrés (Yu et al., 2009). Por ejemplo, cuando no se emplea la fertilización (SNF) en el frijol en condiciones del bosque seco tropical, no solo se presentan limitaciones estomáticas (g_{lim}) causadas por el aumento de alrededor de 1°C del diferencial de temperatura foliar (LTD) (Deva et al., 2020; Orozco et al., 2012), si no que se presentan limitaciones no estomáticas, como lo demuestra los incrementos en la concentración subestomática de CO_2 (C_i) (Flexas y Medrano, 2002; Lawlor, 2009).

La fertilización optimiza la capacidad de las plantas para asimilar CO_2 atmosférico a través de la fotosíntesis (Brown y Green, 2018). Los incrementos en la eficiencia fotosintética



observados al aumentar las dosis de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) independientemente del tipo de fertilización (inorgánica u orgánico mineral), pueden estar relacionados con la habilidad de la planta para optimizar su capacidad fotosintética por un incremento en el suplemento de NPK (Sanclemente y Peña, 2008; Xu et al., 2015). Es posible que la mayor presencia de K debido a la fertilización inorgánica (INF) provocará una elevada absorción de este elemento en los canales de entrada, haciendo que las células de guarda posibilitaran una mayor apertura estomática (Taiz et al., 2017), este efecto puede explicar por qué los parámetros de intercambio gaseoso de la fertilización inorgánica fueron un poco más altos que los de la fertilización orgánico mineral (OFCC y OFCF). Asimismo, los tratamientos OFCC y OFCF mostraron mayores parámetros de intercambio gaseoso que el tratamiento control sin fertilización (SNF), lo que indica que la aplicación de fertilizantes orgánicos promueve la apertura de los estomas para aumentar efectivamente los intercambios de H_2O y CO_2 entre el medio ambiente y el frijol, minimizando el daño de la fotosíntesis en frijol causado por la baja fertilidad del suelo y el estrés abiótico (Mathobo et al., 2017; Zhang et al., 2020).

Combinar fertilizantes orgánicos e inorgánicos mejoran los componentes del rendimiento de frijol común en condiciones de altas temperaturas

El frijol común es un cultivo sensible a suelos de baja fertilidad (Nascente et al., 2017), que combinado con las altas temperaturas del bosque seco tropical limitan la producción de frijol (Beebe et al., 2011). Los tratamientos que incluyeron fertilizantes orgánicos (OFCC y OFCF) presentaron mayor acumulación de la biomasa de raíz (RoW). El crecimiento de raíces en condiciones de baja disponibilidad hídrica es un rasgo que permite medir la capacidad de las raíces para obtener agua del suelo (Ambachew et al., 2015a; Darkwa et al., 2016). Es decir, que el frijol común, con la aplicación combinada de fertilizantes orgánicos e inorgánicos responde positivamente a la baja disponibilidad hídrica en el bosque seco tropical. Sin embargo, la mineralización de nutrientes es más rápida con el tratamiento INF, permitiendo una mayor acumulación de biomasa del dosel (CB) debido al rápido suministro de nutrientes (Mekki, 2016). No obstante, el beneficio más importante de los tratamientos que incluyeron fertilizantes orgánicos (OFCC y OFCF) es el suministro más prolongado de nutrientes a las plantas de frijol que el tratamiento INF (Silva et al., 2024), que se traduce en mejores características de crecimiento y rendimiento (Mahmoud y Gad, 2020). Por ejemplo, entre los rasgos más significativos aportados por la fertilización orgánico mineral 2 (OFCF), encontramos un incremento en la acumulación de biomasa del dosel (CB) (Amanullah et al., 2022;

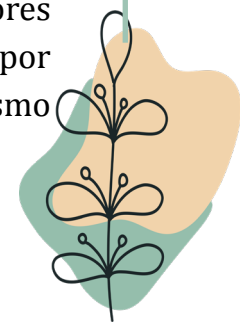


Dorahy et al., 2004; El-Yazal, 2020), índice de cosecha (HI) y producción de granos por planta (RG) (Ahmadi & Arain, 2021; Maman, 2013; Sitinjak & Purba, 2018; Zafar et al., 2011), este efecto se atribuye a la liberación gradual de los nutrientes esenciales que necesita el frijol por el fertilizante orgánico y a la disponibilidad de elementos de NPK del fertilizante inorgánico (Lima et al., 2009; Mitchell y Tu, 2005; Saha et al., 2008).

Los rasgos de los componentes del rendimiento son generalmente buenos indicadores del estrés en general, y nuestro estudio mostró reducciones significativas en HI y RG en condiciones del bosque seco tropical cuando no se empleó la fertilización (SNF) (Ambachew et al., 2015b; Asfaw et al., 2014). Se cree que la reducción en la producción de grano es causada por la disminución en la asimilación de fotosintatos y la mala partición de carbohidratos en el grano en desarrollo debido a la alta temperatura y baja disponibilidad hídrica (Asfaw et al., 2012; Rezene et al., 2011). La fuerte asociación entre la asimilación de fotosintatos y una mejor removilización de carbohidratos en frijol con el tratamiento (OFCF) permite mantener una mayor producción de grano independientemente de las condiciones de suelo y clima del bosque seco tropical (Singh, 1995).

Mecanismos de adaptación del aparato fotosintético del frijol común al tipo de fertilización

En nuestro estudio, la fertilización edáfica que incluyó fuentes orgánicas redujo ciertos factores fisiológicos del frijol en comparación con las mostradas por la fuente inorgánica, como respuesta para adaptarse a la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Observamos que, con aplicación de fertilización orgánico mineral (OFCC y OFCF), el frijol, mantiene sus procesos fotosintéticos sin mayores impactos, como lo demuestra la relación positiva entre la tasa de fotosíntesis neta con la acumulación de biomasa o la producción de grano. Este comportamiento se debe principalmente a la plasticidad en los mecanismos para mantener el funcionamiento adecuado del aparato fotosintético (Gong et al., 2015; Suárez et al., 2022b). Por ejemplo, cuando se emplea fertilización inorgánica (INF), el frijol aumenta la g_s , es decir, un aumento del sustrato (C_i) para la fijación de carbono (P_n) a nivel celular al aumentar también E y WUE_c . El frijol, a través de la transferencia de calor latente, mantuvo una temperatura foliar más baja en relación con la del aire (Traub et al., 2018), por lo tanto, el enfriamiento por transpiración permitió que se mantuvieran los procesos fotosintéticos sin mayores impactos por las altas temperaturas (Ergo et al., 2018), lo que fue respaldado por valores altos en P_n , WUE_c , CB, HI y RG, estos rasgos se identifican como un mecanismo



fisiológico de tolerancia al calor relacionados con el uso gasométrico del agua (Habermann et al., 2019). Siguiendo los aportes de Salazar et al (2018) identificamos un comportamiento anisohídrico del frijol (gasta agua) cuando se emplea fertilización inorgánica, manteniendo la eficiencia en la movilización de fotosintatos para la formación de granos en condiciones de alta temperatura, utilizando el mecanismo de diferencial de temperatura foliar (LTD) (Deva et al., 2020; Suárez et al., 2021), donde el agua se intercambia por carbono y luego el carbono se incorpora a la biomasa, que se relaciona con el uso efectivo del agua (Boomiraj et al., 2010; Dubey et al., 2020; Suárez et al., 2021; Urban et al., 2017). Contrario fue lo observado en la planta de frijol cuando se usó la fertilización orgánico mineral 1 (OFCC), donde identificamos un comportamiento isohídrico (ahorro de agua), caracterizado por E baja que provocó aumento de LTD, pero con la capacidad de tener un WUE_e alto (Hatfield y Prueger, 2015), que se atribuye a un mayor contenido de agua dentro de las hojas, permitiendo mantener la capacidad térmica (gs) baja en altas temperaturas (Albrecht et al., 2020; Eustis et al., 2020; Suárez et al., 2021). Sin embargo, este ahorro de agua significó una baja acumulación de biomasa, producción de grano e índice de cosecha más bajo en comparación con el tratamiento INF. En cuanto a la fertilización orgánico mineral 2 (OFCCF), observamos características muy similares al tratamiento OFCC (isohídrico), con la diferencia de que la E baja no provocó aumento de LTD y la tasa de fotosíntesis neta no se vio limitada por un WUE_e bajo. Este mecanismo se basa en ahorrar agua en el suelo, disipar hasta cierto punto el efecto negativo de la temperatura del aire, pero siendo eficiente en la fijación de carbono y la translocación (Wang et al., 2021), permitiendo un mayor rendimiento de grano en comparación con INF, OFCC. Por otro lado, el tratamiento control sin fertilización (SNF), presentó limitaciones estomáticas (g_{lim}), reduciendo el flujo de calor latente y aumentando la temperatura de la hoja (Orozco et al., 2012), reduciendo significativamente la fisiología de la planta, especialmente en el manejo del agua y la eficiencia de la fotosíntesis (Santos et al., 2020), comprometiendo drásticamente la acumulación de biomasa y el rendimiento del grano (Perdomo et al., 2016; Suárez et al., 2020; Wahid et al., 2007).

Un hallazgo importante en este estudio, es que la eficiencia fotosintética del frijol se mantiene bajo la aplicación de nutrientes a través de la fertilización edáfica ya sea de tipo inorgánico u orgánico mineral. Es decir, la fertilización, sin importar la fuente, optimiza la capacidad de las plantas para asimilar CO_2 atmosférico a través de la fotosíntesis (Brown y Green, 2018). La mejora de las características fotosintéticas se observó durante las etapas de crecimiento, floración, llenado de vainas y contribuyó a un aumento en el rendimiento del grano. Estos resultados proporcionan evidencia



a los pequeños agricultores para considerar la aplicación de la fertilización orgánico mineral como práctica agronómica para mejorar los componentes del rendimiento y para la optimización del agua en condiciones de altas temperaturas.

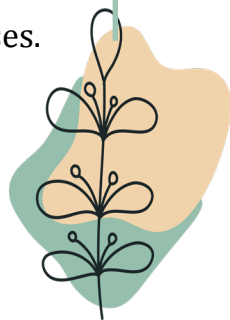
Conclusiones

El análisis climatológico (1992-2023) mostró que aproximadamente el 42% de las temporadas de crecimiento experimentaron al menos 1 día en el que las temperaturas máximas diarias superaron los 30°C. Esto sugiere que las altas temperaturas diurnas son un riesgo para la producción en el ecosistema de bosque seco del departamento del Huila. Además, los perfiles climatológicos para los años 1992-2023 mostraron que los mayores desafíos del cultivo de frijol son valores altos de temperaturas máximas, valores más bajos de temperaturas mínimas, escasas precipitaciones en los primeros 50 días de la temporada y valores altos de VPD.

Encontramos efectos positivos con la fertilización orgánico mineral 2 (OFCF) en frijol a través de cambios en los índices de partición de biomasa, lo que indica una mayor movilización de fotosintatos hacia la producción de grano. Sin embargo, con la fertilización orgánico mineral 1 (OFCC), los componentes del rendimiento disminuyen a través de la biomasa de dosel, índice de cosecha y producción de granos por planta, comparados con la fertilización inorgánica (INF). A nivel de la producción general de grano, OFCF aumentó el rendimiento en 236,7 kg ha⁻¹ más que la obtenida con INF y 35,7 kg ha⁻¹ por encima del promedio nacional de frijol arbustivo, debido a la habilidad de la planta para optimizar su capacidad fotosintética gracias al suministro más prolongado de NPK y al uso de un mecanismo fisiológico basado en ahorrar agua en el suelo y disipar el efecto negativo de la temperatura del aire. Por lo tanto, el uso OFCF bajo las condiciones de suelo y las altas temperaturas del bosque seco tropical mejoran el rendimiento de grano por unidad de área con un menor gasto del recurso hídrico. Recomendamos un ajuste en el componente inorgánico de la fertilización orgánico mineral 1 (OFCC) para mejorar la producción.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un posible conflicto de intereses.



Contribución de la autoría

Jhon Eduar Noriega Ortega: metodología, investigación, curación de datos, análisis de datos, conceptualización, escritura, revisión y edición.

Jairo Polania Reyes: metodología, investigación.

Karen Natalia Asencio Otalora: conceptualización, escritura.

Agradecimientos

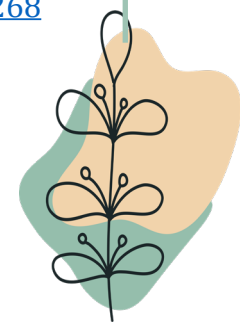
100

Esta investigación se realizó gracias al proyecto “Aprovechamiento de biomasa residual de café y cacao como estrategia de uso eficiente de macronutrientes para la producción de alimentos SGPS 11404 – 2023” de la línea programática: 66 - Investigación aplicada y semilleros de investigación en Centros de Formación del Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación (SENNOVA) del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA y al Centro de Formación Agroindustrial, Regional Huila.

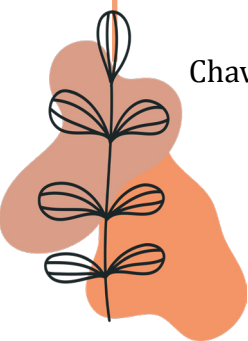


Referencias bibliográficas

- Abera, T., T. T., & L. M. P. (2005). Grain Yield and LER of Maize-climbing Bean Intercropping as Affected by Inorganic, Organic Fertilisers and Population Density in Western Oromiya, Ethiopia. *Asian Journal of Plant Sciences*, 4(5), 458-465. <https://doi.org/10.3923/AJPS.2005.458.465>
- Ahmadi, Y. A., & Arain, J. M. (2021). The Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Response to Different Levels of Organic and Inorganic Fertilizers. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*, 4(3), 439-450. <https://doi.org/10.38001/ijlsb.981373>
- Albrecht, H., Fiorani, F., Pieruschka, R., Müller-Linow, M., Jedmowski, C., Schreiber, L., Schurr, U., & Rascher, U. (2020). Quantitative Estimation of Leaf Heat Transfer Coefficients by Active Thermography at Varying Boundary Layer Conditions. *Frontiers in Plant Science*, 10, 319685. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.01684/BIBTEX>
- Amanullah, Yar, M., Khalid, S., Elshikh, M. S., Akram, H. M., Imran, Al-Tawaha, A. R. M., Ahmad, M., Muhammad, A., Ullah, S., Ali, I., Fahad, S., Adnan, M., & Ali, A. (2022). Phenology, growth, productivity, and profitability of mungbean as affected by potassium and organic matter under water stress vs. no water stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 45(5), 629-650. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1936025>
- Ambachew, D., Mekbib, F., Asfaw, A., Beebe, S. E., & Blair, M. W. (2015a). Trait associations in common bean genotypes grown under drought stress and field infestation by BSM bean fly. *The Crop Journal*, 3(4), 305-316. <https://doi.org/10.1016/J.CJ.2015.01.006>
- Ambachew, D., Mekbib, F., Asfaw, A., Beebe, S. E., & Blair, M. W. (2015b). Trait associations in common bean genotypes grown under drought stress and field infestation by BSM bean fly. *The Crop Journal*, 3(4), 305-316. <https://doi.org/10.1016/J.CJ.2015.01.006>
- Andrade, E. R., Ribeiro, V. N., Azevedo, C. V. G., Chiorato, A. F., Williams, T. C. R., & Carbonell, S. A. M. (2016). Biochemical indicators of drought tolerance in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Euphytica* 2016 210:2, 210(2), 277-289. <https://doi.org/10.1007/S10681-016-1720-4>
- Araújo, S. S., Beebe, S., Crespi, M., Delbreil, B., González, E. M., Gruber, V., Lejeune-Henaut, I., Link, W., Monteros, M. J., Prats, E., Rao, I., Vadez, V., & Patto, M. C. V. (2015). Abiotic Stress Responses in Legumes: Strategies Used to Cope with Environmental Challenges. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 34, 237-280. <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.898450>



- Asfaw, A., Blair, M. W., Asfaw, A., & Blair, M. W. (2014). Quantification of drought tolerance in Ethiopian common bean varieties. *Agricultural Sciences*, 5(2), 124-139. <https://doi.org/10.4236/AS.2014.52016>
- Asfaw, A., Blair, M. W., & Struik, P. C. (2012). Análisis de loci de rasgos cuantitativos multiambiente para la adquisición, acumulación y removilización de fotosintato en frijol común bajo estrés por sequía. *Abierto Volumen 2, Número 5, Páginas 579 - 595*, 2(5), 579-595. <https://doi.org/10.1534/g3.112.002303>
- Baghdadi, A., Halim, R. A., Ghasemzadeh, A., Ramlan, M. F., & Sakimin, S. Z. (2018). Impact of organic and inorganic fertilizers on the yield and quality of silage corn intercropped with soybean. *PeerJ*, 2018(10), e5280. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.5280/SUPP-5>
- Beebe, S. (2012). Common Bean Breeding in the Tropics. *Plant Breeding Reviews*, 36(1), 357-426. <https://doi.org/10.1002/9781118358566.CH5>
- Beebe, S. E., Rao, I. M., Blair, M. W., & Acosta-Gallegos, J. A. (2013). Phenotyping common beans for adaptation to drought. *Frontiers in Physiology*, 4 MAR, 28034. <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2013.00035/BIBTEX>
- Beebe, S. E., Rao, I. M., Devi, M. J., & Polania, J. (2014). Common beans, biodiversity, and multiple stresses: challenges of drought resistance in tropical soils. *Crop and Pasture Science*, 65(7), 667-675. <https://doi.org/10.1071/CP13303>
- Beebe, S., Ramirez, J., Jarvis, A., Rao, I. M., Mosquera, G., Bueno, J. M., & Blair, M. W. (2011). Genetic Improvement of Common Beans and the Challenges of Climate Change. *Crop Adaptation to Climate Change*, 356-369. <https://doi.org/10.1002/9780470960929.CH25>
- Boomiraj, K., Chakrabarti, B., Aggarwal, P. K., Choudhary, R., & Chander, S. (2010). Assessing the vulnerability of Indian mustard to climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 138(3-4), 265-273. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2010.05.010>
- Bramley, H., Turner, N. C., & Siddique, K. H. M. (2013). Water Use Efficiency. *Genomics and Breeding for Climate-Resilient Crops*, 2, 225-268. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37048-9_6
- Bunce, J. A., & Bunce, J. A. (2006). How do leaf hydraulics limit stomatal conductance at high water vapour pressure deficits? *Plant, Cell & Environment*, 29(8), 1644-1650. <https://doi.org/10.1111/J.1365-3040.2006.01541.X>
- Chavarria Parraga, J. E., Ugando Peñate, M., Sabando García, A. R., Muñoz Parraga, J. P., Bravo Ferrín, R. X., & Villalón Peñate, A. (2020). Necesidades hídricas del fríjol



caupí (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). Calculadas con el coeficiente de cultivo utilizando lisímetro de drenaje. *Ciencia y Agricultura*, 17(3), 111-121. <https://doi.org/10.19053/01228420.v17.n3.2020.11746>

Chávarro, D. L., M, W. A. O., & Trujillo, A. T. (2017). Análisis de compactación en suelo franco arenoso usando herramientas de sistemas de información geográfica en el Centro de Formación Agroindustrial La Angostura - Campoalegre, Huila. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*, 4(1). <https://doi.org/10.23850/RAAA.V4I4.4701>

Chtouki, M., Laaziz, F., Naciri, R., Garré, S., Nguyen, F., & Oukarroum, A. (2022). Interactive effect of soil moisture content and phosphorus fertilizer form on chickpea growth, photosynthesis, and nutrient uptake. *Scientific Reports 2022 12:1*, 12(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10703-0>

Clarkson, D. T. (1996). Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. second edition. 889pp. London: Academic Press, £29.95 (paperback). *Annals of Botany*, 78(4), 527-528. <https://doi.org/10.1006/ANBO.1996.0155>

Darkwa, K., Ambachew, D., Mohammed, H., Asfaw, A., & Blair, M. W. (2016). Evaluation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes for drought stress adaptation in Ethiopia. *The Crop Journal*, 4(5), 367-376. <https://doi.org/10.1016/J.CJ.2016.06.007>

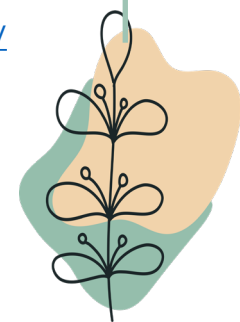
Deva, C. R., Urban, M. O., Challinor, A. J., Falloon, P., & Svitáková, L. (2020). Enhanced Leaf Cooling Is a Pathway to Heat Tolerance in Common Bean. *Frontiers in Plant Science*, 11, 493376. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.00019/BIBTEX>

Dorahy, C. G., Rochester, I. J., & Blair, G. J. (2004). Response of field-grown cotton (*Gossypium hirsutum* L.) to phosphorus fertilisation on alkaline soils in eastern Australia. *Soil Research*, 42(8), 913-920. <https://doi.org/10.1071/SR04037>

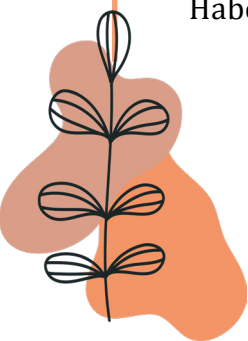
Dubey, R., Pathak, H., Chakrabarti, B., Singh, S., Gupta, D. K., & Harit, R. C. (2020). Impact of terminal heat stress on wheat yield in India and options for adaptation. *Agricultural Systems*, 181, 102826. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2020.102826>

El-Din Mekki, B. (2016). Effect of bio-organic, chemical fertilizers and their combination on growth, yield and some macro and micronutrients contents of faba bean (*Vicia faba* L.). *Bioscience Research*, 13(1), 8-14. www.isisn.org

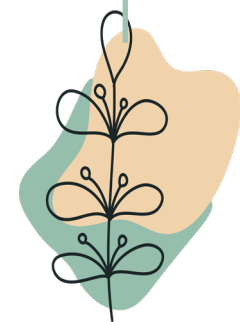
El-Yazal, M. A. S. (2020). Impact of Some Organic Manure with Chemical Fertilizers on Growth, Yield of Broad Bean (*Vicia faba* L.) Grown in Newly Cultivated Land. *Sustainable Food Production*, 9, 23-36. <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/sfp.9.23>



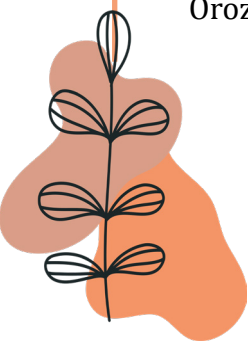
- Ergo, V. V., Lascano, R., Vega, C. R. C., Parola, R., & Carrera, C. S. (2018). Heat and water stressed field-grown soybean: A multivariate study on the relationship between physiological-biochemical traits and yield. *Environmental and Experimental Botany*, 148, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.12.023>
- Eustis, A., Murphy, K. M., & Barrios-Masias, F. H. (2020). Leaf Gas Exchange Performance of Ten Quinoa Genotypes under a Simulated Heat Wave. *Plants* 2020, Vol. 9, Page 81, 9(1), 81. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9010081>
- Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas [Fenalce]. (2023). *Estadísticas - Fenalce*. <https://fenalce.co/estadisticas/>
- Flexas, J., & Medrano, H. (2002). Drought-inhibition of Photosynthesis in C3 Plants: Stomatal and Non-stomatal Limitations Revisited. *Annals of Botany*, 89(2), 183-189. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCF027>
- Gai, Z., Zhang, J., & Li, C. (2017). Effects of starter nitrogen fertilizer on soybean root activity, leaf photosynthesis and grain yield. *PLOS ONE*, 12(4), e0174841. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0174841>
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., & Toulmin, C. (2010). Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science*, 327(5967), 812-818. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1185383>
- Gong, W. Z., Jiang, C. D., Wu, Y. S., Chen, H. H., Liu, W. Y., & Yang, W. Y. (2015). Tolerance vs. avoidance: two strategies of soybean (*Glycine max*) seedlings in response to shade in intercropping. <http://ps.ueb.cas.cz/doi/10.1007/s11099-015-0103-8.html>, 53(2), 259-268. <https://doi.org/10.1007/S11099-015-0103-8>
- Guimarães, R. A. M., Braz, A. J. B. P., Simon, G. A., Ferreira, C. J. B., Braz, G. B. P., & da Silveira, P. M. (2017). Resposta de cultivares de feijoeiro a adubação nitrogenada em diferentes estádios fenológicos. *Global Science and Technology*, 10(1).
- Guo, S., Brück, H., & Sattelmacher, B. (2002). Effects of supplied nitrogen form on growth and water uptake of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants: Nitrogen form and water uptake. *Plant and Soil*, 239(2), 267-275. <https://doi.org/10.1023/A:1015014417018/METRICS>
- Habermann, E., Dias de Oliveira, E. A., Contin, D. R., San Martin, J. A. B., Curtarelli, L., Gonzalez-Meler, M. A., & Martinez, C. A. (2019). Stomatal development and con-



- ductance of a tropical forage legume are regulated by elevated [CO₂] under moderate warming. *Frontiers in Plant Science*, 10, 450408. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.00609/BIBTEX>
- Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
- Hermans, C., Hammond, J. P., White, P. J., & Verbruggen, N. (2006). How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? *Trends in plant science*, 11(12), 610-617. <https://doi.org/10.1016/J.TPLANTS.2006.10.007>
- Holdridge, by L., Joseph Tosi, by A., Revised Edition, J., Jose, S., & Rica, C. (s. f.). *LIFE ZONE ECOLOGY With Photographic Supplement Prepared*.
- Iqbal, A., Khalil, I. A., Ateeq, N., & Sayyar Khan, M. (2006). Nutritional quality of important food legumes. *Food Chemistry*, 97(2), 331-335. <https://doi.org/10.1016/J.FOOD-CHEM.2005.05.011>
- Janick, J. (2012). Plant Breeding Reviews. *Plant Breeding Reviews*, 36, 1-535. <https://doi.org/10.1002/9781118358566>
- Lafitte, H. R. (1994). Identificación de problemas en la producción de maíz tropical: guía de campo. En CIMMYT. CIMMYT. <http://hdl.handle.net/10883/727>
- Lawlor, D. W. (2009). Musings about the effects of environment on photosynthesis. *Annals of Botany*, 103(4), 543-549. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCN256>
- Lima, D. L. D., Santos, S. M., Scherer, H. W., Schneider, R. J., Duarte, A. C., Santos, E. B. H., & Esteves, V. I. (2009). Effects of organic and inorganic amendments on soil organic matter properties. *Geoderma*, 150(1-2), 38-45. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2009.01.009>
- Liu, E., Yan, C., Mei, X., He, W., Bing, S. H., Ding, L., Liu, Q., Liu, S., & Fan, T. (2010). Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China. *Geoderma*, 158(3-4), 173-180. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2010.04.029>
- Mäder, P., Fließbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., & Niggli, U. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 296(5573), 1694-1697. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1071148/SUPPL_FILE/MAEDERSUPPL.PDF



- Mahmoud, S. O., & Gad, G. A. D. (2020). Effect of vermicompost as fertilizer on growth, yield and quality of bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). *Middle East Journal of Agriculture Research*. <https://doi.org/10.36632/mejar/2020.9.1.19>
- Maman, N. (2013). Poultry manure and inorganic fertilizer to improve pearl millet yield in Niger. *African Journal of Plant Science*, 7(5), 162-169. <https://doi.org/10.5897/ajps12.010>
- Massawe, F., Mayes, S., & Cheng, A. (2016). Crop Diversity: An Unexploited Treasure Trove for Food Security. *Trends in Plant Science*, 21(5), 365-368. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.02.006>
- Mathobo, R., Marais, D., & Steyn, J. M. (2017). The effect of drought stress on yield, leaf gaseous exchange and chlorophyll fluorescence of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agricultural Water Management*, 180, 118-125. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2016.11.005>
- Mitchell, C. C., & Tu, S. (2005). Long-Term Evaluation of Poultry Litter as a Source of Nitrogen for Cotton and Corn. *Agronomy Journal*, 97(2), 399-407. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ2005.0399>
- Mora, D. S., Cuellar, L. M., Torrejano, V. M., & Salamanca, D. R. (2017). Incidencia de las condiciones climáticas sobre el cultivo de arroz (*Oryza sativa*) en el municipio de Campoalegre-Huila. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*, 4(1). <https://doi.org/10.23850/RAAA.V4I4.4722>
- Moraga Quezada, M. E. (2021). *Enmiendas orgánicas y sintéticas y su efecto en la producción de maíz (Zea mays L.) y frijol (Phaseolus vulgaris L.) y en la fertilidad del suelo*.
- Nascente, A. S., Carvalho, M. da C. S., Melo, L. C., & Rosa, P. H. (2017). Nitrogênio mineral do solo, nutrição de plantas e produtividade de genótipos de ciclo superprecoces de feijão-comum em função do manejo de nitrogênio. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 39(3), 369-378. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i3.32781>
- Noriega, J. E., Polania, J., Perdomo, M. C., Moreno, Y. D., Murcia, V., Machado, L., & Rivera, H. (2023). *Manual técnico para la elaboración de compost: alternativa de uso sostenible de la biomasa residual de café y cacao*. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. <https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/8341>
- Orozco, J., Cardona Ayala, A., Tatis, A., Fisiología, H., Orozco, A. J., Carlos, Ayala, C., & Hermes, (2012). Efecto del cambio climático sobre la fisiología de las plantas cultivadas: una



revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 15(1), 63-76. <https://doi.org/10.31910/RUDCA.V15.N1.2012.803>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2018). Plan PIDARET propone convertir a Huila en el líder de los sistemas agroalimentarios.

Perdomo, J. A., Carmo-Silva, E., Hermida-Carrera, C., Flexas, J., & Galmés, J. (2016). Acclimation of biochemical and diffusive components of photosynthesis in rice, wheat, and maize to heat and water deficit: Implications for modeling photosynthesis. *Frontiers in Plant Science*, 7(NOVEMBER2016), 225698. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2016.01719/BIBTEX>

Polania, J. A., Poschenrieder, C., Beebe, S., & Rao, I. M. (2016). Effective use of water and increased dry matter partitioned to grain contribute to yield of common bean improved for drought resistance. *Frontiers in Plant Science*, 7(MAY2016), 202541. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2016.00660/BIBTEX>

Porch, T. G., Smith, J. R., Beaver, J. S., Griffiths, P. D., & Canaday, C. H. (2010). TARS-HT1 and TARS-HT2 Heat-tolerant Dry Bean Germplasm. *HortScience*, 45(8), 1278-1280. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.8.1278>

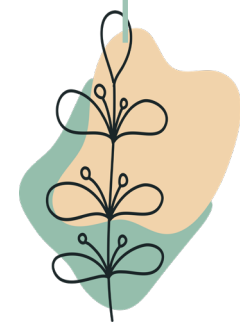
Rao, I. M., Miles, J. W., Beebe, S. E., & Horst, W. J. (2016). Root adaptations to soils with low fertility and aluminium toxicity. *Annals of Botany*, 118(4), 593-605. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCW073>

Rezene, Y., Gebeyehu, S., & Zelleke, H. (2011). Genetic variation for drought resistance in small red seeded common bean genotypes. *African Crop Science Journal*, 19(4), 303-311. <https://www.ajol.info/index.php/acsj/article/view/74187>

Ríos-Castillo, I., Acosta, E., Samudio-Núñez, E., Hruska, A., Gregolin, A., Ríos-Castillo, I., Acosta, E., Samudio-Núñez, E., Hruska, A., & Gregolin, A. (2018). Beneficios Nutricionales, Agroecológicos y Comerciales de las Legumbres. *Revista chilena de nutrición*, 45, 8-13. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182018000200008>

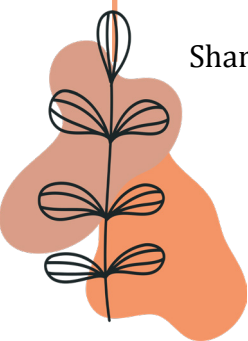
Rosales, M. A., Ocampo, E., Rodríguez-Valentín, R., Olvera-Carrillo, Y., Acosta-Gallegos, J., & Covarrubias, A. A. (2012). Physiological analysis of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars uncovers characteristics related to terminal drought resistance. *Plant Physiology and Biochemistry*, 56, 24-34. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2012.04.007>

Saavedra, D., Cubillos, A., Machado, L., Murcia, V., & Méndez, D. (2018). Análisis de índices de vegetación en el cultivo de arroz en la finca La Tebaida del municipio de



Campoalegre. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*. <https://doi.org/10.23850/raa.v5i1.4746>

- Saavedra-Mora, D., Murcia-Torrejano, V., Machado-Cuellar, L., Sánchez-Cerquera, J., Estrada-Quintero, L. F., & Ordoñez-Espinosa, C. M. (2019). Propiedades físicas y químicas de suelos y su relación con sistemas de producción en el municipio Campoalegre, departamento del Huila, Colombia. *Bioagro*, 31, 151-158. [http://www.ucla.edu.ve/bioagro/Rev31\(2\)/8.%20ms%201833.pdf](http://www.ucla.edu.ve/bioagro/Rev31(2)/8.%20ms%201833.pdf)
- Sage, R. F., Way, D. A., & Kubien, D. S. (2008). Rubisco, Rubisco activase, and global climate change. *Journal of Experimental Botany*, 59(7), 1581-1595. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERN053>
- Saha, S., Mina, B. L., Gopinath, K. A., Kundu, S., & Gupta, H. S. (2008). Organic amendments affect biochemical properties of a subtemperate soil of the Indian Himalayas. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 80(3), 233-242. <https://doi.org/10.1007/S10705-007-9139-X/METRICS>
- Salazar, J. C. S., Polanía, J. A., Bastidas, A. T. C., Suárez, L. R., Beebe, S., & Rao, I. M. (2018). Agronomical, phenological and physiological performance of common bean lines in the Amazon region of Colombia. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 30(4), 303-320. <https://doi.org/10.1007/S40626-018-0125-2/METRICS>
- Salcedo J.M. 2008. Regeneration guidelines: common bean. In: Dulloo M.E., Thormann I., Jorge M.A. and Hanson J., editors. Crop specific regeneration guidelines [CD-ROM]. CGIAR System-wide Genetic Resource Programme, Rome, Italy. 9 pp.
- Sanclemente, M. A., & Peña, E. J. (2008). Growth and Photosynthetic Efficiency of *Ludwigia decurrens* Walter (Onagraceae) Under Different Concentrations of Nitrogen. *Acta biol. Colomb*, 13(1), 175-186.
- Santos, A. R. M., Gomes, F. J., Ximenes, E. S. O. C., Aragão, W. F. D. X., & Silva, A. C. da. (2020). Efeito do ambiente luminoso em forrageiras de clima tropical em sistemas silvopastoris. *Nativa*, 8(5), 633-642. <https://doi.org/10.31413/NATIVA.V8I5.10883>
- Savala, C. E. N., Wiredu, A. N., Okoth, J. O., & Kyei-Boahen, S. (2021). Inoculant, nitrogen and phosphorus improves photosynthesis and water-use efficiency in soybean production. *The Journal of Agricultural Science*, 159(5-6), 349-362. <https://doi.org/10.1017/S0021859621000617>
- Sharkey, T. D., & Seemann, J. R. (1989). Mild Water Stress Effects on Carbon-Reduction-Cycle Intermediates, Ribulose Biphosphate Carboxylase Activity, and Spatial Homogeneity



of Photosynthesis in Intact Leaves. *Plant Physiology*, 89(4), 1060-1065. <https://doi.org/10.1104/PP.89.4.1060>

Silva, T. S. da, Carvalho, I. R., Loro, M. V., Pradebon, L. C., de ALMEIDA, H. C., & Uhde, L. T. (2024). Effects of alternative fertilization on common bean crops regarding productivity and nutritional levels. *Bioscience Journal*, 40. <https://doi.org/10.14393/BJ-v40n0a2024-63214>

Singh, S. P. (1995). Selection for Water-Stress Tolerance in Interracial Populations of Common Bean. *Crop Science*, 35(1), 118-124. <https://doi.org/10.2135/CROPS-CI1995.0011183X003500010022X>

Singh, S. P., Terán, H., Muñoz, C. G., Osorno, J. M., Takegami, J. C., & Thung, M. D. T. (2003). Low Soil Fertility Tolerance in Landraces and Improved Common Bean Genotypes. *Crop science*, 43(1), 110-119. <https://doi.org/10.2135/CROPSCI2003.1100A>

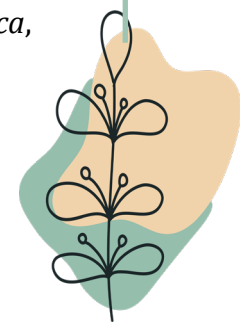
Sitinjak, L., & Purba, E. (2018). Response to growth and production of green beans (*Vigna radiata* L.) in various cropping spots and fertilizer provision of layer chickens. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 122(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/122/1/012053>

Smith, M. R., Reis Hodecker, B. E., Fuentes, D., & Merchant, A. (2022). Investigating Nutrient Supply Effects on Plant Growth and Seed Nutrient Content in Common Bean. *Plants* 2022, Vol. 11, Page 737, 11(6), 737. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11060737>

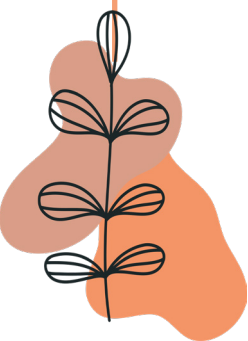
Suárez, J. C., Anzola, J. A., Contreras, A. T., Salas, D. L., Vanegas, J. I., Urban, M. O., Beebe, S. E., & Rao, I. M. (2022a). Influence of Simultaneous Intercropping of Maize-Bean with Input of Inorganic or Organic Fertilizer on Growth, Development, and Dry Matter Partitioning to Yield Components of Two Lines of Common Bean. *Agronomy*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12051216>

Suárez, J. C., Anzola, J. A., Contreras, A. T., Salas, D. L., Vanegas, J. I., Urban, M. O., Beebe, S. E., & Rao, I. M. (2022b). Photosynthetic and grain yield responses to intercropping of two common bean lines with maize under two types of fertilizer applications in the colombian amazon region. *Scientia Horticulturae*, 301. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111108>

Suárez, J. C., Polanía, J. A., Contreras, A. T., Rodríguez, L., Machado, L., Ordoñez, C., Beebe, S., & Rao, I. M. (2020). Adaptation of common bean lines to high temperature conditions: genotypic differences in phenological and agronomic performance. *Euphytica*, 216(2), 1-20. <https://doi.org/10.1007/S10681-020-2565-4/METRICS>



- Suárez, J. C., Urban, M. O., Contreras, A. T., Noriega, J. E., Deva, C., Beebe, S. E., Polanía, J. A., Casanoves, F., & Rao, I. M. (2021). Water Use, Leaf Cooling and Carbon Assimilation Efficiency of Heat Resistant Common Beans Evaluated in Western Amazonia. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2021.644010/BIBTEX>
- Tang, A. C., Kawamitsu, Y., Kanechi, M., & Boyer, J. S. (2002). Photosynthetic Oxygen Evolution at Low Water Potential in Leaf Discs Lacking an Epidermis. *Annals of Botany*, 89(7), 861-870. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCF081>
- Tang, H., Xiao, X., Li, C., Tang, W., Cheng, K., Wang, K., Pan, X., & Li, W. (2019). Effects of Rhizosphere and Long-Term Fertilization Practices on the Activity and Community Structure of Denitrifiers Under Double-Cropping Rice Field. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(6), 682-697. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1589480>
- Traub, J., Porph, T., Naeem, M., Urrea, C. A., Austic, G., Kelly, J. D., & Loescher, W. (2018). Screening for Heat Tolerance in Phaseolus spp. Using Multiple Methods. *Crop Science*, 58(6), 2459-2469. <https://doi.org/10.2135/CROPSCI2018.04.0275>
- Urban, J., Ingwers, M., McGuire, M. A., & Teskey, R. O. (2017). Stomatal conductance increases with rising temperature. *Plant Signaling & Behavior*, 12(8). <https://doi.org/10.1080/15592324.2017.1356534>
- Vargas, Y., Mayor-Duran, V. M., Buendia, H. F., Ruiz-Guzman, H., & Raatz, B. (2021). Physiological and genetic characterization of heat stress effects in a common bean RIL population. *PLOS ONE*, 16(4), e0249859. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0249859>
- Velázquez, E., Silva, L. R., & Peix, A. (2010). Legumes: A Healthy and Ecological Source of Flavonoids. *Current Nutrition & Food Science*, 6(2), 109-144. <https://doi.org/10.2174/157340110791233247>
- Wahid, A. (2007). Physiological implications of metabolite biosynthesis for net assimilation and heat-stress tolerance of sugarcane (Saccharum officinarum) sprouts. *Journal of Plant Research*, 120(2), 219-228. <https://doi.org/10.1007/S10265-006-0040-5/METRICS>
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61(3), 199-223. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2007.05.011>



- Wang, Y., Li, S., Cui, Y., Qin, S., Guo, H., Yang, D., & Wang, C. (2021). Effect of drip irrigation on soil water balance and water use efficiency of maize in northwest China. *Water (Switzerland)*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/w13020217>
- Xu, C. Y., Hosseini-Bai, S., Hao, Y., Rachaputi, R. C. N., Wang, H., Xu, Z., & Wallace, H. (2015). Effect of biochar amendment on yield and photosynthesis of peanut on two types of soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(8), 6112-6125. <https://doi.org/10.1007/S11356-014-3820-9/METRICS>
- Yin, C. Y., Berninger, F., & Li, C. Y. (2006). Photosynthetic responses of *Populus przewalski* subjected to drought stress. <http://ps.ueb.cas.cz/doi/10.1007/s11099-005-0159-y.html>, 44(1), 62-68. <https://doi.org/10.1007/S11099-005-0159-Y>
- Yu, D. J., Kim, S. J., & Lee, H. J. (2009). Stomatal and non-stomatal limitations to photosynthesis in field-grown grapevine cultivars. <http://bp.ueb.cas.cz/doi/10.1007/s10535-009-0019-x.html>, 53(1), 133-137. <https://doi.org/10.1007/S10535-009-0019-X>
- Zafar, M., Abbasi, M. K., Rahim, N., Khaliq, A., Shaheen, A., Jamil, M., & Shahid, M. (2011). Influence of integrated phosphorus supply and plant growth promoting rhizobacteria on growth, nodulation, yield and nutrient uptake in *Phaseolus vulgaris*. *African Journal of Biotechnology*, 10(74), 16781-16792. <https://doi.org/10.5897/AJB11.1395>
- Zhang, P., Yang, F., Zhang, H., Liu, L., Liu, X., Chen, J., Wang, X., Wang, Y., & Li, C. (2020). Beneficial Effects of Biochar-Based Organic Fertilizer on Nitrogen Assimilation, Antioxidant Capacities, and Photosynthesis of Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) under Saline-Alkaline Stress. *Agronomy 2020*, Vol. 10, Page 1562, 10(10), 1562. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10101562>
- Zou, C., Liu, D., Wu, P., Wang, Y., Gai, Z., Liu, L., Yang, F., Li, C., & Guo, G. (2020). Transcriptome analysis of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in response to alkaline stress. *Plant Molecular Biology*, 102(6), 645-657. <https://doi.org/10.1007/S11103-020-00971-7/METRICS>

