

RESEARCH ARTICLE

Optimización Agroindustrial Mediante la Adaptación Genética de *Coffea arabica* y *Coffea canephora* a las Condiciones Climáticas de la Amazonía Ecuatoriana: Estudio de Caso en Arosemena Tola, Napo

Rentería-Chimbo Alejandra Elizabeth ¹   Romero-Guerra Diana Paulin ¹ 
Dávila-Ulloa Maricarmen ¹  Romero Ruiz Samantha Lisseth ¹ 

¹ Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Pastaza, Ecuador

 Correspondencia: ae.renteriac@uea.edu.ec  + 593 95 882 3108

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj71101>

Resumen: Este estudio explora la adaptación genética y las prácticas agrícolas sostenibles como estrategias clave para enfrentar los desafíos climáticos en la producción de café. Mediante una revisión bibliográfica cualitativa, se examinan innovaciones en genética y manejo agrícola que promueven la resiliencia y sostenibilidad de estos cultivos. Los resultados indican la importancia de técnicas como la selección tradicional, marcadores moleculares, ingeniería genética y prácticas integradas de gestión para el desarrollo de variedades resistentes y la optimización de recursos. La discusión subraya la necesidad de un enfoque integrador y colaborativo para implementar estas soluciones, considerando los contextos socioeconómicos y ecológicos específicos de la Amazonía Ecuatoriana. Concluyendo, el estudio enfatiza la viabilidad y urgencia de adoptar estas estrategias adaptativas para asegurar el futuro de la producción cafetalera en la región, destacando la colaboración interdisciplinaria y el desarrollo de políticas de apoyo como elementos cruciales para su éxito.

Palabras claves: Adaptación, Cambio climático, *Coffea Arabica*, *Coffea Canephora*.

Agroindustrial Optimization Through Genetic Adaptation of *Coffea arabica* and *Coffea canephora* to the Climatic Conditions of the Ecuadorian Amazon: Case Study in Arosemena Tola, Napo

Abstract: This study explores genetic adaptation and sustainable agricultural practices as key strategies to address climate challenges in coffee production. Through a qualitative literature review, innovations in genetics and agricultural management that promote resilience and sustainability of these crops are examined. Results indicate the importance of techniques such as traditional breeding, molecular markers, genetic engineering and integrated management practices for the development of resilient varieties and optimization of resources. The discussion underlines the need for an integrative and collaborative approach to implement these solutions, considering the



Check for updates

Cita: Rentería-Chimbo, A. E., Romero-Guerra, D. P., Dávila-Ulloa, M., & Romero Ruiz, S. L. (2024). Optimización Agroindustrial Mediante la Adaptación Genética de *Coffea arabica* y *Coffea canephora* a las Condiciones Climáticas de la Amazonía Ecuatoriana: Estudio de Caso en Arosemena Tola, Napo. *Green World Journal*, 7(1), 101. <https://doi.org/10.53313/gwj71101>

Received: 05/enero /2024

Accepted: 10 /febrero /2024

Published: 28/febrero /2024

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.
Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial
editor@greenworldjournal.com

Editor's note: CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2024 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license.

Creative Commons Attribution (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

specific socioeconomic and ecological contexts of the Ecuadorian Amazon. In conclusion, the study emphasizes the feasibility and urgency of adopting these adaptive strategies to ensure the future of coffee production in the region, highlighting interdisciplinary collaboration and the development of supportive policies as crucial elements for their success.

Keywords: Adaptation, Climate change, Coffea Arabica, Coffea Canephora.

1. Introducción

La agricultura y la agroindustria a nivel global enfrentan desafíos críticos debido a los efectos del cambio climático, que amenazan la sostenibilidad de cultivos esenciales para la economía y la seguridad alimentaria. Entre estos, el café, específicamente las especies *Coffea arabica* y *Coffea canephora*, ocupa un lugar destacado por su relevancia económica, cultural y social en numerosos países. La producción de café se ve particularmente afectada por la variabilidad climática, que impacta negativamente en la productividad y calidad de los cultivos, poniendo en riesgo los medios de vida de millones de agricultores y las economías nacionales que dependen de este producto (1). Ante esta situación, la adaptación genética emerge como una estrategia prometedora para mejorar la resiliencia de estos cultivos a las adversidades climáticas, ofreciendo un camino hacia la sostenibilidad agroindustrial (2).

En el caso específico de Ecuador, la diversidad climática y geográfica del país proporciona una oportunidad única para el cultivo de café, especialmente en regiones como la Amazonía Ecuatoriana. Esta área, caracterizada por su clima húmedo y suelo fértil, presenta condiciones idóneas para la adaptación y el desarrollo de variedades de café más resistentes. Sin embargo, a pesar de estas ventajas naturales, la investigación sobre la adaptación genética de *Coffea arabica* y *Coffea canephora* en esta región es limitada, lo que resalta la importancia de realizar estudios enfocados en estas especies bajo las condiciones específicas de la Amazonía Ecuatoriana (3).

El presente estudio se centra en la optimización agroindustrial a través de la adaptación genética de *Coffea arabica* y *Coffea canephora* en Arosemena Tola, Napo. Este enfoque no solo busca aumentar la productividad y la calidad del café, sino también promover prácticas agrícolas sostenibles que sean resilientes al cambio climático. La adaptación genética, mediante técnicas como el mejoramiento genético y la selección de variedades, ofrece una solución viable para enfrentar los retos impuestos por las condiciones climáticas adversas, mejorando la viabilidad agroindustrial del café en la región (4,5).

Este estudio se inscribe dentro de un contexto más amplio de investigación y desarrollo que busca comprender mejor las respuestas de los cultivos al cambio climático y desarrollar estrategias efectivas para su adaptación. Al investigar la adaptación de *Coffea arabica* y *Coffea canephora* en la Amazonía Ecuatoriana, el estudio contribuye al conocimiento científico necesario para guiar las prácticas agrícolas hacia una mayor sostenibilidad y resiliencia. Además, ofrece información valiosa para los productores de café, los responsables de la formulación de políticas y la comunidad científica, subrayando la importancia de la adaptación genética como herramienta clave para asegurar el futuro de la producción de café frente a los desafíos del cambio climático.

Al abordar estas cuestiones, el estudio no solo aporta a la sostenibilidad de la producción de café en áreas vulnerables al cambio climático, sino que también contribuye significativamente al cuerpo de conocimiento sobre prácticas agrícolas resilientes. A través de este enfoque, se espera facilitar el desarrollo de estrategias adaptativas que permitan a la industria cafetalera ecuatoriana y mundial afrontar con éxito los retos futuros impuestos por el cambio climático.

El cambio climático representa uno de los desafíos más significativos para la agricultura mundial en el siglo XXI. Sus efectos adversos, como el aumento de temperaturas, la variabilidad de las precipitaciones y la intensificación de eventos climáticos extremos, tienen el potencial de alterar los patrones de producción agrícola, reduciendo la disponibilidad de alimentos y comprometiendo la seguridad alimentaria de poblaciones vulnerables (6,7). En este contexto, los cultivos de café, *Coffea arabica* y *Coffea canephora*, son particularmente susceptibles a estas alteraciones climáticas, lo que exige una respuesta inmediata y efectiva para asegurar su viabilidad futura.

La adaptación genética de los cultivos emerge como una estrategia clave para mitigar los impactos del cambio climático. Esta aproximación se basa en el desarrollo y la selección de

variedades de cultivos que sean capaces de soportar condiciones climáticas adversas, tales como temperaturas elevadas, sequías prolongadas y enfermedades emergentes exacerbadas por el cambio climático (8). La adaptación genética no solo se enfoca en preservar la productividad y calidad de los cultivos, sino también en minimizar la huella ambiental de la agricultura, promoviendo prácticas más sostenibles y resilientes.

Ecuador, con su rica biodiversidad y variedad de microclimas, ofrece un escenario único para la implementación de estas estrategias de adaptación en el cultivo de café. La Amazonía Ecuatoriana, y en particular la región de Arosemena Tola, Napo, se destaca por sus condiciones climáticas y edáficas propicias para la agricultura. Sin embargo, la falta de investigación específica en la adaptación genética de café en esta región limita su potencial de desarrollo. Este estudio busca llenar ese vacío, proporcionando evidencia científica sobre la adaptabilidad y el rendimiento de *Coffea arabica* y *Coffea canephora* en condiciones amazónicas, y ofreciendo directrices para la optimización agroindustrial basada en prácticas agrícolas sostenibles y adaptativas.

Además, este trabajo tiene el potencial de contribuir significativamente al desarrollo económico local y nacional. El café es un producto de exportación clave para Ecuador, y la mejora en la productividad y sostenibilidad de este sector puede tener efectos positivos amplios en la economía. Al desarrollar variedades de café más resistentes y productivas, este estudio apoya la competitividad del café ecuatoriano en el mercado global, al mismo tiempo que asegura su sostenibilidad ambiental.

Desde una perspectiva más amplia, la adaptación genética de cultivos como el café tiene implicaciones significativas para la adaptación al cambio climático a nivel global. Al mejorar la resiliencia de los cultivos a las condiciones climáticas cambiantes, se pueden mitigar los impactos negativos en la seguridad alimentaria y los medios de vida agrícolas. Este enfoque también resalta la importancia de la investigación agronómica y genética en la formulación de respuestas adaptativas al cambio climático, subrayando el papel vital de la ciencia y la tecnología en la construcción de un futuro más sostenible y resiliente.

En conclusión, el presente estudio sobre la optimización agroindustrial mediante la adaptación genética de *Coffea arabica* y *Coffea canephora* en la Amazonía Ecuatoriana no solo aborda una necesidad crítica en el sector cafetalero, sino que también ofrece insights valiosos para la adaptación al cambio climático en la agricultura en general. A través de este enfoque, se espera no solo incrementar la sostenibilidad y productividad del café en Arosemena Tola, Napo, sino también contribuir al cuerpo de conocimiento global sobre estrategias efectivas de adaptación para la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible.

2. Materiales y métodos

Este estudio se enmarca dentro de una investigación cualitativa, con un enfoque de revisión bibliográfica, destinado a comprender en profundidad cómo la adaptación genética de *Coffea arabica* y *Coffea canephora* puede optimizar la agroindustria bajo las condiciones climáticas específicas de la Amazonía Ecuatoriana. A través de esta metodología, se busca sintetizar y analizar exhaustivamente la literatura existente, identificando patrones, tendencias y brechas en el conocimiento actual que puedan guiar futuras investigaciones y prácticas agrícolas sostenibles en la región de Arosemena Tola, Napo. La búsqueda de literatura se realizó en bases de datos académicas reconocidas, incluyendo Scopus, Google Scholar y bases de datos específicas de agricultura y ciencias ambientales, como Agricola y CAB Abstracts. Se utilizaron palabras clave relacionadas con la adaptación genética del café, el impacto del cambio climático en la agricultura tropical y la sostenibilidad agroindustrial en la Amazonía.

La información recopilada se sometió a un análisis de contenido cualitativo, utilizando el software NVivo para facilitar la organización y codificación de los datos. Este proceso permitió la identificación de temas recurrentes, tales como estrategias de adaptación genética, impactos del cambio climático en la producción de café y prácticas de manejo sostenible en la agroindustria. Además, se realizó un análisis crítico de las metodologías empleadas en los estudios revisados, evaluando su aplicabilidad y relevancia para las condiciones específicas de la Amazonía Ecuatoriana. La síntesis de la literatura se orientó hacia la construcción de una narrativa coherente que vincula los hallazgos clave de la investigación previa con el contexto específico de este

La figura 2, siendo un mapa de palabras clave relacionado con el café y la investigación en esta área. Las palabras más grandes, como "Coffea canephora", "article", "caffeine" y "genetics", sugieren que son términos frecuentemente mencionados en la literatura relacionada, indicando áreas clave de enfoque en la investigación sobre el café. Los términos relacionados con "genetics" y "genomics" sugieren una concentración en la investigación genética, lo cual es coherente con el enfoque en la mejora de las plantas de café y la adaptación a los desafíos como el cambio climático.

El mapa utiliza diferentes colores para agrupar términos relacionados, lo que ayuda a visualizar cómo los conceptos están interconectados. Por ejemplo, los términos en verde podrían estar relacionados con la biología y genética de la planta, mientras que los rojos podrían referirse a la química y propiedades de los granos de café, como "antioxidant activity" y "chlorogenic acids", que son compuestos relacionados con los beneficios para la salud y la calidad del café. La imagen proporciona una representación visual de los temas prevalentes y de interés en el ámbito de la investigación del café, destacando áreas de estudio como la genética de la planta, la bioquímica de los granos, la mejora de la producción y la adaptación al cambio climático.

3. Resultados

3.1. Adaptación Genética de *Coffea arabica* y *Coffea canephora*

3.1.1. Estrategias de Mejoramiento Genético

3.1.1.1. Selección tradicional y marcadores moleculares

La optimización agroindustrial mediante la adaptación genética de *Coffea arabica* y *Coffea canephora* enfrenta desafíos significativos y oportunidades en el contexto de la Amazonía Ecuatoriana. Los enfoques de selección tradicional, complementados con técnicas avanzadas de marcadores moleculares, se han identificado como estrategias clave para la mejora genética de estas especies de café, buscando desarrollar variedades que sean productivas y resistentes a las adversidades climáticas y enfermedades (9–12).

Selección Tradicional

La selección tradicional ha desempeñado un papel crucial en la mejora de los cultivos de café, aprovechando la rica diversidad genética natural que presentan estas especies. Mediante este proceso, se han podido identificar y seleccionar individuos que muestran características particularmente deseables, tales como un mayor rendimiento en la cosecha, una calidad superior del grano, y una robusta resistencia frente a diversas enfermedades que suelen afectar a estos cultivos (13,14).

Marcadores Moleculares

Los marcadores moleculares han transformado radicalmente los métodos de selección y mejora de cultivos, introduciendo una era de precisión genética sin precedentes en la agricultura. Esta revolucionaria técnica permite a los científicos y mejoradores de plantas identificar con exactitud las características genéticas deseables a nivel molecular, lo que supone un avance significativo respecto a los métodos tradicionales basados en la observación fenotípica. En el caso específico del café, una de las commodities agrícolas más valiosas a nivel mundial, la aplicación de los marcadores moleculares ha abierto nuevas vías para el desarrollo de variedades superiores (15).

Ingeniería genética y edición genómica

La ingeniería genética y la edición genómica han abierto nuevas posibilidades en la mejora de cultivos de café, permitiendo la modificación precisa de genes específicos para lograr características deseables como resistencia a enfermedades, adaptación al cambio climático y mejora de la calidad del grano. A diferencia de los métodos tradicionales de mejora genética, estas tecnologías ofrecen la posibilidad de realizar cambios genéticos específicos en un tiempo mucho más corto y de manera más controlada.

3.1.1.2.1. Ingeniería Genética en Café

La ingeniería genética ha marcado un hito en el desarrollo y mejora de cultivos agrícolas, incluyendo especies de café tan importantes como *Coffea arabica* y *Coffea canephora* (conocida también como robusta). Esta tecnología avanzada permite la inserción directa de genes de interés en el genoma de las plantas, brindando la posibilidad de conferir características específicas que no se lograrían fácilmente a través de métodos de mejora tradicionales o incluso mediante el uso

de marcadores moleculares. En el ámbito del café, estas características pueden incluir resistencia a enfermedades y plagas, así como la tolerancia a factores abióticos adversos, tales como la sequía y el frío, que son de especial interés dado el impacto del cambio climático en la agricultura global (16).

3.1.1.2.2. Edición Genómica mediante CRISPR/Cas9

La edición genómica, particularmente a través de CRISPR/Cas9, ha emergido como una herramienta revolucionaria en la mejora genética del café. Esta tecnología permite la edición precisa del genoma, corrigiendo o alterando secuencias genéticas específicas para mejorar características como la calidad del grano, la cafeína en los granos y la resistencia a condiciones ambientales adversas (17).

3.1.2. Respuestas Fisiológicas al Cambio Climático

3.1.2.1. Tolerancia a la sequía

La tolerancia a la sequía en las plantas de café se puede abordar mediante estrategias de mejora genética que busquen identificar y explotar la variabilidad genética natural o mediante técnicas de biotecnología moderna, como la ingeniería genética y la edición genómica. Estas estrategias se centran en la identificación de genes relacionados con la tolerancia a la sequía y la manipulación de estos genes para mejorar la capacidad de las plantas para resistir períodos de escasez de agua.

3.1.2.1.1. Mejora Genética Convencional

La mejora genética convencional en el cultivo de café, así como en otros cultivos agrícolas, ha sido un pilar fundamental en el desarrollo de variedades más resilientes y productivas, adaptadas a los desafíos ambientales específicos como la sequía. Este enfoque tradicional de selección se basa en la evaluación fenotípica, es decir, en la observación directa y medición de las características físicas y biológicas de las plantas, bajo condiciones controladas de estrés hídrico. La meta es identificar y seleccionar aquellas variedades que muestran una mayor resistencia o tolerancia a la falta de agua, manteniendo al mismo tiempo un rendimiento agrícola aceptable (18).

Proceso de Selección Fenotípica

El proceso de selección fenotípica en la mejora genética convencional del café implica varios pasos críticos:

- **Evaluación de Estrés Hídrico:** Las plantas se someten intencionalmente a condiciones de sequía durante periodos críticos de su ciclo de crecimiento para simular los efectos del estrés hídrico. Esto permite a los mejoradores observar cómo diferentes variedades responden a la falta de agua.
- **Selección Basada en Rendimiento y Calidad:** Las variedades que logran mantener un rendimiento aceptable en términos de cantidad y calidad del grano bajo estrés son candidatas para una selección posterior. Este criterio asegura que la mejora para la tolerancia a la sequía no comprometa las características comerciales esenciales del café.
- **Observación de Rasgos Adaptativos:** Además del rendimiento, se valoran características adaptativas específicas que contribuyen a la tolerancia a la sequía, como la eficiencia en el uso del agua, la profundidad del sistema radicular, la tasa de transpiración, y la capacidad de las plantas para recuperarse después de períodos de estrés hídrico.
- **Selección y Mejora Continua:** Las variedades seleccionadas son sometidas a ciclos sucesivos de cruzamientos y selecciones para combinar la tolerancia a la sequía con otras características deseables, como la resistencia a enfermedades y la calidad del grano.

Ventajas y Limitaciones

La mejora genética convencional tiene la ventaja de ser una tecnología accesible y no requerir manipulación genética avanzada, lo que facilita su aceptación por parte de productores y consumidores. Además, aprovecha la diversidad genética natural del café, lo cual es crucial para la adaptabilidad a largo plazo de las variedades.

3.1.2.1.2. Identificación de Marcadores Genéticos

La identificación de marcadores genéticos asociados con la tolerancia a la sequía ha revolucionado las estrategias de mejora de cultivos, incluido el café, al permitir un enfoque más preciso y dirigido. Los marcadores genéticos son secuencias de ADN que se encuentran cerca de los genes que controlan rasgos de interés, como la tolerancia a la sequía, y pueden usarse como indicadores para la presencia de estos genes. La Selección Asistida por Marcadores (SAM) aprovecha estos marcadores para identificar y seleccionar individuos que poseen los rasgos deseados, incluso sin que los rasgos se manifiesten fenotípicamente. Este enfoque tiene el potencial de acelerar significativamente el proceso de mejora de cultivos al reducir la necesidad de largos periodos de evaluación fenotípica bajo condiciones de estrés (19–22).

Funcionamiento de la SAM

La SAM implica varios pasos clave:

- **Identificación de Marcadores Genéticos:** El primer paso es identificar marcadores genéticos específicos asociados con la tolerancia a la sequía. Esto se logra mediante el análisis genómico y estudios de asociación que correlacionan la presencia de ciertos marcadores con la manifestación del rasgo deseado bajo condiciones de estrés hídrico.
- **Desarrollo de Pruebas de Diagnóstico:** Una vez identificados, estos marcadores se utilizan para desarrollar pruebas moleculares que pueden detectar rápidamente la presencia o ausencia de genes de tolerancia a la sequía en las plantas de café.
- **Selección de Individuos:** Con estas pruebas, los mejoradores pueden seleccionar de manera eficiente las plantas que portan los alelos deseables para la tolerancia a la sequía desde las primeras etapas de desarrollo, mucho antes de que los rasgos se manifiesten fenotípicamente.
- **Mejora y Cruzamiento:** Las plantas seleccionadas se utilizan luego en programas de mejora y cruzamientos dirigidos para desarrollar nuevas variedades que combinan la tolerancia a la sequía con otros rasgos importantes, como el rendimiento y la calidad del grano.

Ventajas de la SAM

La SAM ofrece varias ventajas sobre los métodos convencionales de selección:

- **Eficiencia:** Reduce el tiempo y los recursos necesarios para desarrollar variedades tolerantes a la sequía, ya que permite la selección temprana de plantas con los rasgos deseados.
- **Precisión:** Aumenta la precisión de la selección al basarse en información genética, evitando el impacto de factores ambientales que pueden influir en la evaluación fenotípica.
- **Versatilidad:** Puede combinarse con otras técnicas de mejora genética y biotecnología para integrar múltiples rasgos de interés en una sola variedad.

Desafíos y Consideraciones

A pesar de sus ventajas, la implementación de la SAM enfrenta desafíos, como la necesidad de una inversión inicial significativa en investigación genómica y desarrollo de marcadores. Además, la efectividad de la SAM depende de la complejidad genética del rasgo de interés; rasgos controlados por múltiples genes (poligénicos) y fuertemente influenciados por el ambiente pueden ser más difíciles de mejorar mediante esta técnica.

3.1.2.1.3. Edición Genómica

La edición genómica, y en particular la técnica CRISPR/Cas9, ha emergido como una herramienta revolucionaria en la biotecnología agrícola, ofreciendo posibilidades sin precedentes para la mejora dirigida de cultivos, incluido el café. CRISPR/Cas9 permite la modificación precisa del ADN en loci específicos, lo que significa que los científicos pueden dirigirse y alterar genes específicos responsables de la respuesta de las plantas a la sequía. Esta capacidad de edición precisa abre nuevas vías para mejorar la tolerancia a la sequía en las plantas de café a través de varios mecanismos, como la alteración de las vías de señalización hormonal, la mejora de la eficiencia en el uso del agua, y la modificación de la expresión de genes que codifican proteínas que protegen a las plantas contra el estrés (23).

Mecanismos de Mejora mediante CRISPR/Cas9

- **Alteración de Vías de Señalización Hormonal:** Las hormonas vegetales, como el ácido abscísico (ABA), juegan un papel crucial en la respuesta de las plantas a la sequía, regulando procesos como el cierre de los estomas para minimizar la pérdida de agua. Mediante CRISPR/Cas9, se pueden realizar ajustes precisos en los genes involucrados en estas vías de señalización, potenciando la capacidad de las plantas para conservar agua bajo condiciones de estrés hídrico.
- **Mejora de la Eficiencia del Uso del Agua:** La edición genómica puede dirigirse a genes que influyen en la eficiencia con la que las plantas utilizan el agua, permitiendo el desarrollo de variedades que crecen y producen con menos agua. Esto incluye la mejora de la fotosíntesis y la reducción de la transpiración innecesaria.
- **Modificación de la Expresión de Genes de Proteínas Protectoras:** Las proteínas como las chaperonas moleculares y las enzimas antioxidantes ayudan a las plantas a combatir el daño causado por el estrés abiótico, incluida la sequía. Editando genes para aumentar la expresión de estas proteínas protectoras, las plantas pueden ser más resilientes a las condiciones de estrés.

3.1.2.2. Resistencia a temperaturas extremas

Las temperaturas extremas, tanto bajas que conducen a heladas como altas que resultan en estrés térmico, presentan desafíos significativos para la producción de café, afectando adversamente el crecimiento de las plantas, su desarrollo, y finalmente, su rendimiento. Para abordar estos desafíos, la mejora genética y las técnicas biotecnológicas avanzadas se están empleando para desarrollar variedades de café más resilientes a estas condiciones extremas. Estos esfuerzos incluyen tanto métodos tradicionales de mejoramiento como enfoques modernos de biotecnología, como la ingeniería genética y la edición genómica, con el objetivo de introducir y optimizar rasgos de resistencia a las temperaturas extremas en las plantas de café.

3.1.2.2.1. Mejora Genética para Resistencia al Frío

La selección de variedades nativas de café y la creación de híbridos que exhiban mayor resistencia al frío constituyen estrategias fundamentales en el campo de la mejora genética para enfrentar los desafíos climáticos, especialmente en regiones susceptibles a temperaturas bajas que pueden afectar negativamente la producción de café. La clave para el éxito de estas estrategias radica en la identificación y manipulación de genes específicos asociados con la resistencia al frío, lo que permite el desarrollo de plantas de café más robustas capaces de sobrevivir, adaptarse y mantener su productividad bajo condiciones de baja temperatura (24).

Estrategias para Mejorar la Resistencia al Frío en Café

- **Selección de Variedades Nativas:** La exploración de la diversidad genética existente dentro de las especies de café puede revelar variedades nativas que naturalmente poseen una mayor tolerancia al frío. Estas variedades pueden ser seleccionadas para su cultivo en áreas propensas a bajas temperaturas o utilizadas como progenitores en programas de mejoramiento para transferir rasgos de resistencia al frío a otras líneas de café.
- **Creación de Híbridos Resistentes al Frío:** El cruzamiento dirigido de variedades seleccionadas por su resistencia al frío con otras variedades que ofrecen características deseables (como calidad del grano, rendimiento, o resistencia a enfermedades) puede resultar en la creación de híbridos que combinen estos rasgos valiosos, incluida la tolerancia a bajas temperaturas.
- **Identificación y Manipulación de Genes Relacionados con la Resistencia al Frío:** Avances en la genómica y biotecnología han facilitado la identificación de genes específicos que contribuyen a la resistencia al frío en las plantas. La comprensión de cómo estos genes afectan la tolerancia al frío permite el desarrollo de estrategias para manipularlos, ya sea aumentando su expresión o introduciendo genes de resistencia al frío de otras especies a través de técnicas de ingeniería genética.

Aplicaciones y Beneficios

- **Mejora de la Resiliencia Climática:** Al desarrollar variedades de café más resistentes al frío, se puede mejorar la resiliencia de los cultivos frente a las fluctuaciones climáticas, asegurando la producción en áreas anteriormente consideradas marginales debido a su vulnerabilidad a bajas temperaturas.

- **Expansión de Zonas de Cultivo:** Con variedades más tolerantes al frío, es posible expandir las zonas de cultivo de café a regiones que tradicionalmente no eran adecuadas debido a sus condiciones climáticas, contribuyendo a la diversificación y estabilidad de la producción de café a nivel global.

3.1.2.2.2. Tolerancia al Calor mediante la Selección Asistida por Marcadores

La selección asistida por marcadores (SAM) emerge como una herramienta poderosa en la mejora genética del café, particularmente en la búsqueda de variedades capaces de soportar condiciones de calor extremo. Esta estrategia se basa en el uso de marcadores genéticos específicos asociados con la tolerancia al calor, lo que permite una selección más eficiente y precisa de las plantas con las características deseadas sin depender exclusivamente de la evaluación fenotípica, que puede ser más lenta y menos precisa (25).

Principios de la SAM en la Tolerancia al Calor

- **Identificación de Marcadores Genéticos:** La primera etapa en la SAM implica la identificación de secuencias de ADN que estén estrechamente vinculadas a los genes responsables de la regulación térmica y la protección contra el daño por estrés térmico. Estos marcadores sirven como indicadores para la presencia de genes de interés que confieren tolerancia al calor.
- **Selección de Variedades:** Utilizando estos marcadores, los mejoradores pueden analizar rápidamente el material genético de un gran número de individuos para identificar aquellos que poseen las variantes genéticas deseadas. Esto acelera significativamente el proceso de selección, permitiendo a los mejoradores centrarse en las plantas con una mayor probabilidad de éxito en condiciones de calor extremo.

Aplicaciones y Beneficios

- **Eficiencia Mejorada:** La SAM permite una selección más rápida y precisa en comparación con los métodos convencionales, reduciendo el tiempo y los recursos necesarios para desarrollar variedades tolerantes al calor.
- **Desarrollo de Variedades Resilientes:** Al identificar variedades con una mejor tolerancia al calor, es posible mejorar la resiliencia del café a las olas de calor y al estrés térmico, condiciones que se están volviendo más frecuentes y severas debido al cambio climático.
- **Mejora de la Productividad y Calidad:** Las variedades seleccionadas para tolerancia al calor no solo pueden mantener su rendimiento bajo temperaturas elevadas sino también preservar o incluso mejorar la calidad del grano, un aspecto crucial para los productores de café y consumidores.

3.1.2.2.3. Edición Genómica para Mejorar la Resistencia a Temperaturas Extremas

La tecnología CRISPR/Cas9, junto con otras técnicas avanzadas de edición genómica, representa una revolución en la mejora genética de cultivos, incluido el café. Estas herramientas permiten modificar de manera precisa los genes responsables de las respuestas a temperaturas extremas, abriendo caminos innovadores para el desarrollo de variedades de café con mecanismos de defensa térmica mejorados. Esta precisión en la edición genética brinda una oportunidad sin precedentes para abordar desafíos específicos del cultivo, como la resistencia al calor y al frío, de manera más eficaz y en tiempos más cortos que los métodos tradicionales de mejoramiento (26).

- **Mecanismos de Defensa contra el Estrés Térmico**

Las plantas de café, como otros organismos, tienen mecanismos naturales para enfrentar el estrés térmico, que incluyen la regulación de proteínas de choque térmico, antioxidantes, y vías de señalización hormonal. Estos mecanismos pueden ser alterados o potenciados mediante la edición genómica para mejorar la tolerancia a temperaturas extremas.

3.1.3. Adaptaciones al Manejo Agronómico

3.1.3.1. Prácticas de cultivo sostenible

Las prácticas sostenibles en la agricultura del café incluyen una amplia gama de técnicas y estrategias que se centran en la conservación del suelo, el manejo eficiente del agua, la diversificación de cultivos, y el control biológico de plagas y enfermedades. Estas prácticas no solo benefician al medio ambiente sino que también pueden contribuir a mejorar la calidad y cantidad de la producción de café.

3.1.3.1.1. Conservación del Suelo y Manejo del Agua

Las técnicas de conservación del suelo y los sistemas de riego eficientes juegan roles fundamentales en la agricultura sostenible, especialmente en el cultivo del café, donde la erosión del suelo y el manejo eficiente del agua son preocupaciones críticas. La adopción de estas prácticas no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también puede mejorar significativamente la salud y productividad de los cultivos de café (27).

Técnicas de Conservación del Suelo

- Cobertura Vegetal: El uso de plantas de cobertura entre los cultivos de café protege el suelo contra la erosión causada por el viento y el agua. Esta práctica ayuda a mantener la estructura del suelo, promover la biodiversidad y mejorar la retención de agua y los ciclos de nutrientes.
- Terrazas: En zonas inclinadas, las terrazas reducen la velocidad del escurrimiento del agua, disminuyendo la erosión y permitiendo una mayor infiltración de agua en el suelo. Esto es particularmente valioso en las regiones cafetaleras montañosas.
- Barreras Vivas: Consisten en filas de árboles o arbustos plantados entre o alrededor de los cultivos de café. Estas barreras no solo reducen la erosión del suelo sino que también pueden proporcionar hábitat para la fauna beneficiosa, contribuyendo a la biodiversidad del agroecosistema.

3.1.3.1.2. Diversificación de Cultivos y Agroforestería

La diversificación mediante cultivos intercalados y la práctica de la agroforestería son estrategias agrícolas sostenibles clave que ofrecen múltiples beneficios ambientales, económicos y sociales, especialmente en el contexto del cultivo de café. Al integrar árboles y otros cultivos dentro de las plantaciones de café, los agricultores pueden crear sistemas agrícolas resilientes que promueven la biodiversidad, mejoran la salud del suelo, y ofrecen protección contra los impactos negativos de los extremos climáticos (28).

3.1.3.1.3. Control Biológico de Plagas y Enfermedades

El Manejo Integrado de Plagas (MIP) representa un enfoque holístico y sostenible para la gestión de plagas en la agricultura, especialmente en cultivos como el café, donde el equilibrio ecológico es crucial para la productividad y la sostenibilidad a largo plazo. Al incorporar controladores biológicos naturales, como insectos beneficiosos, hongos y bacterias, el MIP busca reducir la dependencia de pesticidas químicos, mitigando así sus impactos negativos sobre el medio ambiente y la salud humana (29).

3.1.3.2. Gestión integrada de plagas y enfermedades

La gestión integrada de plagas y enfermedades en los cultivos de café implica la combinación de prácticas culturales, biológicas, genéticas, y en algunos casos, químicas, para controlar de manera efectiva las plagas y enfermedades, minimizando los impactos ambientales negativos y los riesgos para la salud humana (29). A continuación se muestran algunas de estas estrategias en la tabla 1:

Tabla 1

Estrategias en la gestión integrada

Categoría	Estrategias y Prácticas
Prácticas Culturales	– Rotación de cultivos y diversificación. – Labranza mínima y acolchado. – Eliminación y manejo adecuado de residuos de cultivos y plantas enfermas.
Control Biológico	– Uso de enemigos naturales (insectos depredadores, parásitos, patógenos). – Aplicación de microorganismos beneficiosos.
Mejoramiento Genético	– Desarrollo y uso de variedades resistentes o tolerantes. – Incorporación de genes de resistencia mediante mejoramiento convencional o ingeniería genética.
Uso de Productos Químicos	– Aplicación dirigida y dosificada de productos químicos de menor toxicidad. – Rotación de diferentes clases de pesticidas para prevenir resistencia.

Monitoreo y Toma de Decisiones Basada en Umbrales	– Inspección regular de cultivos. – Establecimiento de umbrales de acción para intervención.
Educación y Capacitación	– Entrenamiento en identificación de plagas y enfermedades. – Promoción de prácticas de manejo seguras y efectivas.
Legislación y Políticas de Apoyo	– Desarrollo de políticas para promover la gestión integrada. – Regulaciones para el uso seguro de pesticidas y protección de enemigos naturales.

Nota: Autores (2024)

3.1.3.2.1. Prácticas Culturales

Las prácticas culturales en la agricultura, especialmente en el contexto de las plantaciones de café, son fundamentales para la gestión sostenible de plagas y enfermedades. Estas prácticas se centran en la manipulación del ambiente o del comportamiento de las plantas para hacerlas menos vulnerables a los ataques de plagas y enfermedades. Al implementar estas estrategias, los agricultores pueden mejorar significativamente la salud y la productividad de sus cultivos, reduciendo al mismo tiempo la necesidad de intervenciones químicas (29).

Principales Prácticas Culturales en Plantaciones de Café

- **Rotación de Cultivos:** Alternar el café con otros cultivos puede interrumpir el ciclo de vida de plagas y enfermedades específicas del café. Esta práctica ayuda a reducir la acumulación de patógenos y plagas en el suelo, minimizando los riesgos de infecciones en los ciclos sucesivos de cultivo.
- **Selección de Sitios Adecuados para la Plantación:** Elegir lugares con condiciones óptimas para el cultivo de café (como la altitud, orientación solar, y drenaje adecuado) puede disminuir la vulnerabilidad de las plantas a ciertas plagas y enfermedades. Un buen drenaje, por ejemplo, puede prevenir enfermedades fúngicas que prosperan en condiciones de humedad.
- **Manejo Adecuado del Suelo y del Agua:** Mantener la salud del suelo mediante la incorporación de materia orgánica y asegurar un riego adecuado puede fortalecer las plantas de café, haciéndolas más resilientes a plagas y enfermedades. Un suelo sano promueve un sistema radicular fuerte, esencial para la absorción de nutrientes y agua.
- **Eliminación de Residuos de Cultivos y Hospederos Alternativos:** La limpieza de restos de cultivos y la eliminación de malezas que pueden servir como hospederos para plagas y patógenos son cruciales para reducir su población. Esto incluye la gestión de los residuos de poda y la eliminación de plantas enfermas o infestadas para evitar que se conviertan en fuentes de infección.
- **Uso de Variedades Resistentes:** La selección y plantación de variedades de café resistentes o tolerantes a plagas y enfermedades específicas es una práctica cultural efectiva. Estas variedades han sido desarrolladas para poseer características genéticas que las protegen contra ciertos patógenos y plagas.
- **Distanciamiento y Densidad de Plantación Adecuados:** Ajustar la distancia entre las plantas y su densidad puede mejorar la circulación del aire y reducir la humedad relativa alrededor del follaje, disminuyendo así la incidencia de enfermedades fúngicas y bacterianas.

3.1.3.2.2. Control Biológico

El control biológico representa una estrategia ecológica clave en el manejo integrado de plagas y enfermedades en la agricultura, incluyendo las plantaciones de café. Al aprovechar los enemigos naturales de las plagas, esta metodología ofrece una alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente a los pesticidas químicos, minimizando su uso y sus impactos negativos asociados (30).

Principales Componentes del Control Biológico

- **Predadores:** Son organismos que se alimentan de plagas. En el contexto del café, ciertos insectos y ácaros beneficiosos pueden consumir una amplia gama de plagas, incluyendo áfidos, cochinillas y larvas de insectos.
- **Parasitoides:** Insectos que depositan sus huevos en o sobre una plaga hospedera; las larvas del parasitoide se alimentan del hospedero, eventualmente causando su

muerte. Los parasitoides son especialmente valiosos en el control de poblaciones de insectos plaga, como las brocas del café.

- Patógenos: Microorganismos como hongos, bacterias, y virus que causan enfermedades en las plagas. Estos agentes biológicos pueden ser específicos de ciertas plagas y se utilizan para su control sin afectar a otros organismos no objetivo.

Para una implementación exitosa, es crucial el conocimiento detallado de la dinámica poblacional de las plagas y sus enemigos naturales, así como las condiciones ambientales que afectan su eficacia. La integración del control biológico en un plan de manejo integrado de plagas (MIP) permite a los agricultores manejar las poblaciones de plagas de manera efectiva, manteniendo al mismo tiempo la salud del ecosistema agrícola.

3.1.3.2.3. Resistencia Genética

La incorporación de variedades de café resistentes a plagas y enfermedades constituye una estrategia fundamental en el manejo sostenible de los cultivos de café, minimizando la necesidad de intervenciones químicas y promoviendo prácticas agrícolas más amigables con el ambiente. Esta aproximación se apoya en la mejora genética, aprovechando tanto técnicas convencionales como avances biotecnológicos, para desarrollar plantas de café con resistencias específicas (31).

El uso de variedades resistentes también contribuye a la estabilidad de la producción, ya que las plantas son más capaces de soportar ataques de plagas y enfermedades sin una reducción significativa en la cantidad o calidad de la cosecha. Esto es particularmente importante para los pequeños productores de café, quienes a menudo son los más afectados por los brotes de enfermedades y plagas debido a la falta de recursos para combatirlas eficazmente. La mejora genética convencional ha sido utilizada durante mucho tiempo para desarrollar nuevas variedades de café con resistencia a problemas específicos. Este proceso implica seleccionar y cruzar plantas con características deseables, como la resistencia a una enfermedad particular, y luego seleccionar las mejores plantas de las generaciones subsiguientes para continuar el mejoramiento.

3.1.3.2.4. Uso Racional de Agroquímicos

Cuando es necesario el uso de agroquímicos, la MIP promueve su uso racional, seleccionando productos específicos para el objetivo, dosis mínimas efectivas, y la rotación de modos de acción para evitar el desarrollo de resistencia. El monitoreo constante de plagas y enfermedades es crucial para aplicar tratamientos solo cuando sea estrictamente necesario, según umbrales económicos predefinidos.

3.2. Impactos del Cambio Climático en la Producción de Café

3.2.1. Variabilidad Climática y Rendimiento de Cultivos

3.2.1.1. Efectos de las variaciones de temperatura y precipitación

3.2.1.1.1. Impacto en la Fisiología de las Plantas de Café

Las variaciones en temperatura afectan la fotosíntesis, la respiración, la floración y la maduración de los frutos del café. Temperaturas más altas pueden acelerar estos procesos, pero también pueden aumentar el estrés hídrico y reducir la productividad si no van acompañadas de un aumento proporcional en la disponibilidad de agua (32). Por otro lado, temperaturas más bajas o heladas pueden dañar las plantaciones de café, especialmente en regiones no tradicionales para su cultivo.

Las variaciones en la precipitación tienen un impacto significativo en la producción de café, afectando tanto la cantidad como la calidad del grano producido. La gestión adecuada del agua y la adaptación a estas variaciones son cruciales para asegurar la sostenibilidad de las plantaciones de café. A continuación, se describen los efectos de la precipitación en el café y algunas estrategias de adaptación (33):

Efectos de la Variación de Precipitación en el Café

- Sequía: Periodos prolongados sin lluvia pueden limitar la disponibilidad de agua, afectando el crecimiento y desarrollo de las plantas de café, lo que resulta en una reducción del tamaño y la calidad de los granos. La falta de agua también puede impactar negativamente en la floración y la fijación de los frutos, reduciendo significativamente los rendimientos.

- **Precipitación Excesiva:** Por otro lado, un exceso de lluvia puede causar saturación del suelo, lo que limita la disponibilidad de oxígeno para las raíces, conduciendo a la asfixia radicular y al deterioro de las plantas. Además, la humedad elevada favorece la aparición y propagación de enfermedades fúngicas, como la roya del café y la antracnosis, que pueden devastar plantaciones enteras.

Estrategias de Adaptación

Mejora Genética

- **Variedades Resistentes a la Sequía:** Desarrollar y promover el uso de variedades de café genéticamente adaptadas para soportar periodos de sequía. Estas variedades pueden poseer características como sistemas radiculares más profundos o eficiencia mejorada en el uso del agua.
- **Resistencia a Enfermedades:** La selección y mejora de variedades resistentes a enfermedades fúngicas son esenciales para minimizar las pérdidas en condiciones de alta humedad.

Manejo Agronómico

- **Conservación del Agua:** Implementar prácticas de conservación del agua como el mulching, que ayuda a retener la humedad del suelo, y sistemas de riego eficientes, como el riego por goteo, para optimizar el uso del agua durante periodos secos.
- **Drenaje:** Mejorar el drenaje en las plantaciones de café para evitar el encharcamiento del suelo y reducir el riesgo de enfermedades radiculares en periodos de lluvia intensa.

Manejo Integrado de Enfermedades

- **Monitoreo y Control:** Establecer prácticas de monitoreo para detectar tempranamente la presencia de enfermedades y aplicar medidas de control integrado, incluyendo el uso de fungicidas cuando sea necesario y prácticas culturales que reduzcan la humedad en el follaje y el suelo.

Adaptación al Cambio Climático

- **Diversificación de Cultivos:** La diversificación con otros cultivos puede reducir la dependencia del café como única fuente de ingreso, proporcionando una red de seguridad en años de malas cosechas debido a la variabilidad climática.
- **Agroforestería:** Integrar árboles en las plantaciones de café para crear microclimas más estables, reducir la evaporación del agua y mejorar la infiltración de agua en el suelo, lo que puede ayudar a mitigar los efectos tanto de la sequía como del exceso de lluvia.

3.2.1.1.2. Distribución Geográfica de Plagas y Enfermedades

El cambio climático también altera la distribución geográfica de las plagas y enfermedades que afectan al café, con organismos patógenos y plagas desplazándose a altitudes y latitudes donde anteriormente no eran prevalentes, debido a las condiciones climáticas más favorables (34). Esto representa un desafío adicional para la gestión de plagas y enfermedades en las plantaciones de café.

3.2.1.1.3. Adaptación y Estrategias de Mitigación

La adaptación a estos cambios requiere el desarrollo de variedades de café más resistentes a temperaturas extremas y a la variabilidad en la precipitación, así como prácticas agrícolas que mejoren la retención de agua en el suelo, el uso eficiente del agua y el control integrado de plagas y enfermedades (35). Aquí hay algunas estrategias que podrían ser implementadas:

Desarrollo de Variedades Resistentes al Clima:

- Los programas de mejoramiento genético deben enfocarse en desarrollar variedades de café que puedan soportar temperaturas más altas y sean capaces de adaptarse a cambios en los patrones de precipitación.
- La biotecnología puede ser una herramienta valiosa en este aspecto, permitiendo la creación de variedades que no solo son resistentes a plagas y enfermedades, sino también más tolerantes al estrés hídrico y térmico.

Mejora de la Retención de Agua:

- La conservación del agua a través de prácticas como el acolchado, que cubre el suelo alrededor de las plantas con materiales orgánicos para reducir la evaporación.

- Uso de sistemas de riego eficientes, como el riego por goteo, que minimizan el uso del agua y la distribuyen de manera más eficiente a las raíces de las plantas.

Prácticas Agrícolas Sostenibles:

- Agricultura de conservación, que incluye técnicas como la labranza mínima, la rotación de cultivos y la diversificación de cultivos, para mejorar la salud del suelo y la biodiversidad.
- Integración de cultivos y árboles (agroforestería), que puede proporcionar sombra para las plantas de café, reduciendo el estrés térmico y mejorando la microfauna del suelo.

Control Integrado de Plagas y Enfermedades:

- Combinar prácticas agrícolas, como la rotación de cultivos y la selección de variedades resistentes, con el uso de enemigos naturales de las plagas y la aplicación de biopesticidas cuando sea necesario.
- Monitoreo constante de plagas y enfermedades para intervenir de manera temprana y específica, evitando brotes masivos que requieran intervenciones más drásticas.

Gestión Eficiente del Agua:

- Implementación de sistemas de captación de agua de lluvia y construcción de infraestructuras de almacenamiento de agua para asegurar la disponibilidad durante períodos de sequía.
- Educación y entrenamiento de los agricultores en prácticas de conservación de agua y adaptación al cambio climático.

3.2.1.2. Impacto en la calidad del grano

3.2.1.2.1. Influencia de la Temperatura y la Precipitación en la Calidad del Café

Las variaciones en temperatura y precipitación tienen un impacto significativo en la calidad del grano de café, incluyendo la concentración de azúcares, ácidos, y compuestos fenólicos, los cuales son críticos para el sabor, aroma, y otras características deseables del café (36). Un clima más cálido puede acelerar la maduración del fruto, afectando adversamente la acumulación de azúcares y reduciendo la calidad del grano. Por otro lado, una adecuada distribución de lluvias es esencial para el desarrollo óptimo del fruto y la calidad del grano, mientras que un exceso de humedad puede incrementar el riesgo de enfermedades y deteriorar la calidad.

3.2. Análisis del Beneficiado Después de la Cosecha

El beneficiado del café, que incluye procesos post-cosecha como el despulpado, la fermentación, el lavado, y el secado, es fundamental para determinar la calidad del café. La adaptación genética de las variedades de café a condiciones climáticas específicas puede influir significativamente en la eficiencia y efectividad de estas etapas, debido a la variabilidad en la composición química de los granos y su comportamiento ante los procesos de fermentación y secado.

Despulpado y Fermentación: La adaptación genética puede resultar en granos con características físicas que favorezcan un despulpado más eficiente y una fermentación controlada, lo cual es esencial para desarrollar el perfil de sabor deseado. La consistencia en la calidad del grano puede reducir las pérdidas durante este proceso y mejorar el rendimiento del beneficiado.

Secado: Las características genéticas que favorezcan una absorción y desorción de humedad uniforme pueden optimizar el proceso de secado, reduciendo el riesgo de desarrollo de moho o de otros defectos que degradan la calidad.

3.3. Valor Añadido al Producto Final

La optimización de estas etapas no solo incrementa la eficiencia y reduce los costos, sino que también mejora significativamente la calidad del producto final. Un café de alta calidad, con atributos sensoriales superiores, puede acceder a mercados más exigentes y a segmentos de precio más alto. Esto se traduce en:

Diferenciación del Producto: La adaptación genética permite la creación de perfiles de sabor únicos y distintivos, que pueden ser promocionados como atributos de valor agregado, especialmente en nichos de mercado que valoran la singularidad y la trazabilidad del café.

Sostenibilidad y Resiliencia: La adaptación a condiciones climáticas locales no solo mejora la sostenibilidad de la producción al reducir la necesidad de insumos químicos y de riego, sino que también incrementa la resiliencia de la producción frente a eventos climáticos extremos, lo cual es un valor añadido importante en el contexto actual de cambio climático.

Certificaciones y Mercados Premium: El café producido bajo estas condiciones puede calificar para certificaciones de sostenibilidad y calidad, como Comercio Justo, Orgánico, o Denominaciones de Origen, que son altamente valoradas en el mercado y permiten el acceso a precios premium.

En conclusión, la adaptación genética de *Coffea arabica* y *Coffea canephora* para su optimización agroindustrial en la Amazonía Ecuatoriana tiene el potencial de transformar significativamente tanto la eficiencia de producción como la calidad del café, contribuyendo al desarrollo de un producto final con mayor valor en el mercado global. Este enfoque integrado, que considera tanto la adaptación genética del cultivo como su posterior beneficiado, es fundamental para maximizar los beneficios económicos, ambientales, y sociales de la agroindustria del café en regiones vulnerables al cambio climático.

4. Discusión

Los resultados obtenidos destacan la importancia de la selección tradicional y el uso de marcadores moleculares para identificar variedades de *Coffea arabica* y *Coffea canephora* con mayor tolerancia a condiciones adversas, como sequías y temperaturas extremas. Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que enfatizan la adaptación genética como una estrategia clave para mejorar la resiliencia de los cultivos ante el cambio climático (35). La ingeniería genética y la edición genómica emergen como herramientas complementarias, ofreciendo nuevas posibilidades para el desarrollo de variedades con características deseables de manera más rápida y precisa (37).

La investigación subraya la eficacia de prácticas de cultivo sostenible, como la gestión integrada de plagas y enfermedades y la optimización del uso del agua y recursos. Estas prácticas no solo contribuyen a la reducción de la huella ambiental de la producción de café sino que también mejoran la calidad del grano, un aspecto crucial para la competitividad en el mercado internacional. Además, la implementación de estrategias de resiliencia comunitaria y la adaptación de sistemas de producción son fundamentales para asegurar la sostenibilidad a largo plazo de la agroindustria cafetalera en la Amazonía Ecuatoriana.

A pesar de los avances significativos, persisten desafíos importantes, como el impacto de las variaciones de temperatura y precipitación en la producción de café. Estos desafíos requieren una atención continua y la búsqueda de soluciones innovadoras para mitigar los efectos negativos del cambio climático. La integración con cultivos nativos y la promoción de beneficios ecológicos y productivos demuestran ser estrategias prometedoras para aumentar la biodiversidad y la resiliencia de los sistemas de producción.

Esto refleja cómo la combinación de técnicas de mejora genética con prácticas de manejo sostenible puede ofrecer un camino viable hacia la optimización de la producción de café en la Amazonía Ecuatoriana. Sin embargo, es fundamental que estas estrategias se implementen dentro de un marco de gestión integrada que considere tanto las necesidades económicas como las ambientales y sociales de las comunidades involucradas. Futuras investigaciones deberían enfocarse en evaluar la adaptabilidad de estas estrategias en diferentes contextos geográficos y socioeconómicos, así como en desarrollar modelos predictivos más precisos que ayuden a anticipar los efectos del cambio climático en la agroindustria cafetalera.

5. Conclusión

La selección de variedades de *Coffea arabica* y *Coffea canephora* adaptadas genéticamente a condiciones climáticas extremas, como altas temperaturas y sequías, es fundamental para asegurar la sostenibilidad de la producción de café en la Amazonía Ecuatoriana. La aplicación de técnicas como la ingeniería genética y la edición genómica promete acelerar este proceso, permitiendo el desarrollo de cultivos más resistentes y productivos. Las estrategias de manejo integrado, incluyendo la gestión de plagas y enfermedades, la optimización del uso del agua y la integración con cultivos nativos, han demostrado ser esenciales para mejorar la eficiencia

productiva y la sostenibilidad ambiental. Estas prácticas no solo benefician la calidad del grano de café, sino que también contribuyen a la conservación de los ecosistemas locales y al bienestar de las comunidades agrícolas.

A pesar de los avances tecnológicos y agronómicos, el cambio climático sigue representando un desafío significativo para la producción de café en la Amazonía Ecuatoriana. Las variaciones en temperatura y precipitación requieren de un monitoreo continuo y de la adaptación constante de las prácticas de cultivo para minimizar impactos negativos en la productividad y calidad del café. La adaptación y mitigación frente al cambio climático deben considerarse como un proceso continuo y dinámico. La investigación y el desarrollo en genética de plantas, junto con prácticas agrícolas innovadoras y sostenibles, son cruciales para asegurar un futuro productivo y sostenible para la industria cafetalera en esta región. La colaboración entre investigadores, productores y entidades gubernamentales será clave para implementar las estrategias de adaptación más efectivas.

Este estudio subraya la necesidad de continuar la investigación en adaptación genética y prácticas agrícolas sostenibles, enfocándose en la implementación y evaluación de estas estrategias en el terreno. Es imperativo fomentar una mayor colaboración interdisciplinaria y el desarrollo de políticas públicas que apoyen la innovación tecnológica y la sostenibilidad en la producción de café. Asimismo, se destaca la importancia de incorporar la voz de las comunidades locales en la toma de decisiones, asegurando que los beneficios de la investigación y la innovación sean compartidos equitativamente. En conclusión, el éxito de la producción de café en la Amazonía Ecuatoriana frente a los desafíos del cambio climático dependerá de la capacidad para integrar eficazmente la adaptación genética con prácticas agrícolas sostenibles y resilientes. Este enfoque holístico no solo fortalecerá la industria cafetalera sino que también contribuirá a la conservación de la biodiversidad y al desarrollo sostenible de la región.

Contribución de autores: Los autores contribuyeron en todos los apartados de documento.

Financiamiento: Los autores financiaron a integridad el estudio.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. Davis AP, Chadburn H, Moat J, O'Sullivan R, Hargreaves S, Nic Lughadha E. High extinction risk for wild coffee species and implications for coffee sector sustainability. *Sci Adv.* 2019;5(1).
2. Reilly JM. Overview: Climate change adaptation in the agricultural sector. In: *Advances in Global Change Research*. Dordrecht: Springer Netherlands; 2011. p. 347–57.
3. Haggard J, Schepp K. *Coffee and Climate Change: Impacts and Options for Adaptation in Brazil, Guatemala, Tanzania and Vietnam*. 2012.
4. Labouisse JP, Bellachew B, Kotecha S, Bertrand B. Current status of coffee (*Coffea arabica* L.) genetic resources in Ethiopia: implications for conservation. *Genet Resour Crop Evol.* 2008;55(7):1079–93.
5. Avelino J, Cristancho M, Georgiou S, Imbach P, Aguilar L, Bornemann G, et al. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Secur.* 2015;7(2):303–21.
6. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021 – the physical science basis: Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press; 2023.
7. Armendariz Sandoval SP. Influencia del diésel en el sector agrícola del Cantón Quindindé: Perspectivas económica. *Journal of Economic and Social Science Research.* 2021;1(3).
8. Bitá CE, Gerats T. Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. *Front Plant Sci.* 2013;4.

9. Bertrand B, Boulanger R, Dussert S, Ribeyre F, Berthiot L, Descroix F, et al. Climatic factors directly impact the volatile organic compound fingerprint in green Arabica coffee bean as well as coffee beverage quality. *Food Chem.* 2012;135(4):2575–83.
10. Silvarolla MB, Mazzafera P, Fazuoli LC. A naturally decaffeinated arabica coffee. *Nature.* 2004;429(6994):826.
11. Ruiz Sánchez CI, Herrera Feijoo RJ, Correa Salgado M de L, Peñafiel Arcos PA. *Fundamentos Teóricos de Química Inorgánica. Fundamentos Teóricos de Química Inorgánica.* 2023.
12. Chicaiza–Ortiz CD, Rivadeneira–Arias V del C, Herrera–Feijoo RJ, Andrade JC. Guía de Biotecnología Ambiental. In: *Biotecnología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias.* 2023.
13. Jassogne L, Läderach P, Asten P V. THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON COFFEE IN UGANDA lessons from a case study in the Rwenzori Mountains. 2013;
14. González–Marcillo RL, Guamán–Rivera SA, Guerrero–Pincay AE, Ortiz–Naveda NR. *Pastos Tropicales de la Amazonia Ecuatoriana Tomo I: Avances científicos sobre sistemas silvopastoriles como estrategia de reconversión de la ganadería [Internet].* Editorial Grupo AEA. Editorial Grupo AEA; 2023 [cited 2024 Feb 1]. Available from: <https://www.editorialgrupo-aea.com/index.php/EditorialGrupoAEA/catalog/book/46>
15. Anthony F, Combes M, Astorga C, Bertrand B, Graziosi G, Lashermes P. The origin of cultivated *Coffea arabica* L. varieties revealed by AFLP and SSR markers. *Züchter Genet Breed Res.* 2002;104(5):894–900.
16. Leroy T, Henry AM, Royer M, Altosaar I, Frutos R and Duris D, Philippe R. Genetically modified coffee plants expressing the *Bacillus thuringiensis cry 1Ac* gene for resistance to leaf miner. *Plant Cell Rep.* 2000;19(4):382–5.
17. Breitler JC, Dechamp E, Campa C, Zebal Rodrigues LA, Guyot Romain and Marraccini P, Etienne H. CRISPR/Cas9–mediated efficient targeted mutagenesis has the potential to accelerate the domestication of *Coffea canephora*. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 2018;134(3):383–94.
18. Benti T, Gebre E, Tesfaye K, Berecha G, Lashermes P, Kyallo M, et al. Genetic diversity among commercial arabica coffee (*Coffea arabica* L.) varieties in Ethiopia using simple sequence repeat markers. *J Crop Improv.* 2021;35(2):147–68.
19. Marraccini P, Gomes VN, Duarte KE, Aquino SO, Carneiro FA, Costa TS, et al. Molecular responses of coffee plants to drought stress : S04T04. 2013.
20. Chicaiza–Ortiz CD, Rivadeneira–Arias V del C, Herrera–Feijoo RJ, Andrade JC. Prácticas de laboratorio y cuestionario sobre biotecnología ambiental. In: *Biotecnología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias.* 2023.
21. Herrera–Feijoo RJ, Chicaiza–Ortiz CD, Rivadeneira–Arias V del C, Andrade JC. Análisis bibliométrico como una herramienta en la biotecnología ambiental. In: *Biotecnología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias.* 2023.
22. Chicaiza–Ortiz CD, Rivadeneira–Arias V del C, Herrera–Feijoo RJ, Andrade JC. *Biotecnología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias.* Biotecnología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias. 2023.
23. Giardi MT, Cona A, Geiken B, Kučera T, MasojW'Widek J, Mattoo AK. Long–term drought stress induces structural and functional reorganization of photosystem II. *Planta.* 1996;199(1):118–25.
24. Yamane K, Nishikawa M, Hirooka Y, Narita Y, Kobayashi T, Kakiuchi M, et al. Temperature tolerance threshold and mechanism of oxidative damage in the leaf of *Coffea arabica* 'Typica' under heat stress. *Plant Prod Sci.* 2022;25(3):337–49.
25. Silva AG, Ariyoshi C, Shigueoka LH, Pereira LFP, Sera GH. Assisted selection using molecular markers linked to rust resistance SH3 gene in *Coffea arabica*. *Crop Breed Appl Biotechnol.* 2023;23(4).
26. Casarin T, Freitas NC, Pinto RT, Breitler J, Rodrigues LAZ, Marraccini P, et al. Multiplex CRISPR/Cas9–mediated knockout of the phytoene desaturase gene in *Coffea canephora*. *Sci Rep.* 2022;12(1).

27. Ho TQ, Hoang VN, Wilson C. Sustainability certification and water efficiency in coffee farming: The role of irrigation technologies. *Resour Conserv Recycl.* 2022;180(106175):106175.
28. Perfecto I, Vandermeer J, Wright A. *Nature's matrix: Linking agriculture, biodiversity conservation and food sovereignty.* 2nd ed. Londres, Inglaterra: Routledge; 2019.
29. Oliveira JR De, Santana Wesley do Rosário and Altoé JA, Carrion PAN, Baldan WG, Lima AS, Rosa LVCAF, et al. Integrated Pest Management In Coffee. *Int J Plant Soil Sci.* 2021;9–16.
30. Cerda R, Avelino J, Harvey CA, Gary C, Tixier P, Allinne C. Coffee agroforestry systems capable of reducing disease-induced yield and economic losses while providing multiple ecosystem services. *Crop Prot.* 2020;134(105149):105149.
31. Vega. The use of fungal entomopathogens as endophytes in biological control: a review. *Mycologia.* 2018;110(1):4–30.
32. DaMatta FM, Avila RT, Cardoso Amanda A and Martins SC V, Ramalho JC. Physiological and agronomic performance of the coffee crop in the context of climate change and global warming: A review. *J Agric Food Chem.* 2018;66(21):5264–74.
33. Jaramillo J, Muchugu E, Vega FE, Davis A, Borgemeister C, Chabi-Olaye A. Some like it hot: The influence and implications of climate change on coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) and coffee production in east Africa. *PLoS One.* 2011;6(9):e24528.
34. Bilen C, El Chami D, Mereu V, Trabucco A, Marras S, Spano D. A systematic review on the impacts of Climate Change on coffee agrosystems. *Plants.* 2022;12(1):102.
35. Bunn C, Läderach P, Ovalle Rivera Oriana and Kirschke D. A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Clim Change.* 2015;129(1–2):89–101.
36. Camargo MBP de. The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil. *Bragantia.* 2010;69(1):239–47.
37. Voss-Fels KP, Stahl A, Hickey LT. Q&A: modern crop breeding for future food security. *BMC Biol.* 2019 Dec 25;17(1):18.