

Colección Estudios Agropecuarios

Programa de Mejoramiento Genético de Cacao: una propuesta para aunar esfuerzos a nivel nacional en beneficio del productor de cacao colombiano

Caren Rodríguez-Medina

Olivier Sounigo

Roxana Yockteng Benalcázar

Gladys Alejandra Romero Guerrero

Danilo Augusto Monsalve García

Colección Estudios Agropecuarios

Programa de Mejoramiento Genético de Cacao: una propuesta para aunar esfuerzos a nivel nacional en beneficio del productor de cacao colombiano

Caren Rodríguez-Medina

Olivier Sounigo

Roxana Yockteng Benalcázar

Gladys Alejandra Romero Guerrero

Danilo Augusto Monsalve García

AGROSAVIA
EDITORIAL

Mosquera, Colombia, 2023

Programa de mejoramiento genético de cacao en Colombia: una propuesta para aunar esfuerzos a nivel nacional en beneficio del productor de cacao colombiano. / Caren Rodríguez Medina [y otros cuatro]. -- Mosquera, (Colombia) : AGROSAVIA, 2023.

72 páginas (Colección Estudios Agropecuarios)

Incluye referencias bibliográficas, fotografías y gráficos.

ISBN e-Book: 978-958-740-649-8

1. *Theobroma cacao* 2. Mejoramiento genético 3. Clones 4. Calidad de la semilla 5. Propagación vegetativa 6. Selección recurrente 7. Tecnología apropiada. I. Rodríguez Medina, Caren II. Sounigo, Olivier III. Yockteng Benalcázar, Roxana IV. Romero Guerrero, Gladys Alejandra V. Monsalve García, Danilo Augusto.

Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura Agrovoc

Catalogación en la publicación – Biblioteca Agropecuaria de Colombia

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)

Centro de Investigación Palmira. Diagonal a la intersección de la carrera 36A con calle 23, Palmira, Valle del Cauca. Código postal 763533, Colombia.

Centro de Investigación Tibaitatá. Kilómetro 14 vía Mosquera-Bogotá, Mosquera. Código postal 250047, Colombia.

Centro de Investigación El Nus. Corregimiento San José del Nus, municipio de San Roque, Antioquia. Código postal 053037, Colombia.

Centro de Investigación La Suiza. Kilómetro 32 Vía al Mar, vereda Galápagos, Rionegro-Santander. Código postal 687511, Colombia.

Esta publicación es el resultado del macroproyecto de mejoramiento genético de cacao como estrategia para fortalecer la cacao-cultura colombiana.

Colección: Estudios Agropecuarios

Tipología: Obra de Reflexión y Análisis

Fecha de recepción: 11 de noviembre de 2022

Fecha de evaluación: 17 de enero de 2023

Fecha de aceptación: 12 de abril de 2023

Publicado: agosto de 2023

Preparación editorial

Editorial Agrosavia

editorial@agrosavia.co

Dirección editorial: Astrid Verónica Bermúdez Díaz

Edición: Liliana Gaona García

Corrección de estilo: Nathalie De la Cuadra Núñez N.

Diagramación: Diego Abello Rico

Citación sugerida: Rodríguez-Medina, C., Sounigo, O., Yockteng Benalcázar, R., Romero Guerrero, G. A., & Monsalve García, D. A. (2023). *Programa de Mejoramiento Genético de Cacao en Colombia: una propuesta para aunar esfuerzos a nivel nacional en beneficio del productor de cacao*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.analisis.7406498>

Cláusula de responsabilidad: AGROSAVIA no es responsable de las opiniones y de la información recogida en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, declarando en este último supuesto que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación. Igualmente, expresan que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros, relativa a los derechos de autor u otros derechos que se vulnere como resultado de su contribución.

Línea de atención al cliente: 018000121515

atencionalcliente@agrosavia.co

<http://www.agrosavia.co>



https://co.creativecommons.org/?page_id=13

Los autores	7
Glosario	11
Prefacio	13
Introducción	17
Limitantes de la producción y la calidad en Colombia	21
Enfermedades e insectos plaga	21
Manejo agronómico	23
Limitantes en poscosecha	25
Limitantes de la polinización	26
Contaminación por metales pesados	27
Programa de Mejoramiento Genético de Cacao	31
Objetivo general	31
Objetivos específicos	32
Premejoramiento	32
Clones comerciales registrados en Colombia	35
Estrategia actual de mejoramiento genético de cacao de AGROSAVIA: selección recurrente	39
Interacción genotipo × ambiente	42
Uso de técnicas de secuenciación de alto rendimiento	44

Estado actual del Programa de Mejoramiento Genético de cacao de AGROSAVIA	47
Obtención de progenies y selección combinada “árbol/progenie”	47
Siguiendo ciclos de SR	48
Portainjertos	49
Estrategia Nacional de Mejoramiento Genético de Cacao: una propuesta para aunar esfuerzos en beneficio del productor de cacao colombiano	51
Agradecimientos	53
Referencias	55

Los autores

Caren Rodríguez-Medina

Correo electrónico: cdrodriguez@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4227-2026>

Ingeniera agrónoma de la Universidad Nacional de Colombia. Realizó sus estudios de posgrado en Mejoramiento Genético Vegetal en Australia, en la Universidad de Adelaida y en la Universidad de Australia Occidental. En Francia, realizó un posdoctorado en el departamento de Virología del Instituto Nacional para la Investigación Agronómica (INRA) acerca de la interacción virus-planta. En la actualidad, lidera el Programa de Mejoramiento Genético de Cacao de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), el cual busca aprovechar la diversidad genética de la especie que existe en el país para obtener materiales mejorados, tanto copas como patrones, con atributos agronómicos de interés y de importancia económica.

Olivier Sounigo

Correo electrónico: osounigo@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6278-8903>

Fitomejorador especializado en cacao, con maestría en Biología Celular y Molecular Vegetal de la Universidad Paris XI. Integrante del Centre de Coopération Internationale de Recherche en Agronomie pour le Développement (CIRAD) desde 1985 e investigador visitante en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) desde 2017. Tiene experiencia en los ámbitos de selección clásica, selección participativa y manejo de recursos genéticos. Ha participado en la publicación de varios artículos relacionados con el fitomejoramiento del cacao.

Roxana Yockteng Benalcázar

Correo electrónico: ryockteng@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2133-6139>

Bióloga con énfasis en biología evolutiva y genética de poblaciones de plantas. Obtuvo sus diplomas de BSc y MSc en la Universidad de los Andes, y su diploma de doctorado en la Universidad París XI-Sud en Orsay, Francia. Su investigación ha estado dirigida al estudio de la evolución de plantas. En 2005, obtuvo un cargo como profesora asociada en el Museo Nacional de Historia Natural de París, donde realizó trabajos sobre la evolución de interacción entre plantas y organismos. Trabajó como investigadora en la Universidad de California en Berkeley, donde desarrolló estudios de evolución y de evo-devo de plantas. Desde octubre de 2014 ha sido investigadora PhD de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), donde estudia la diversidad genética de cacao y los mecanismos genéticos relacionados con la resistencia a enfermedades, la absorción de cadmio y la autoincompatibilidad en este cultivo. Participa también en la caracterización molecular de especies conservadas en el banco de germoplasma vegetal. Ha publicado múltiples artículos relacionados con el cultivo del cacao.

Gladys Alejandra Romero Guerrero

Correo electrónico: gromero@cenipalma.org

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9394-5174>

Bióloga con énfasis en biotecnología vegetal de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), magíster y doctora en Ciencias Agropecuarias, línea de investigación Genética y Fitomejoramiento, de la Universidad Nacional de Colombia. En 2006 comenzó trabajando como investigadora en el Programa de Mejoramiento Genético del Centro Nacional de Investigación de Café (Cenicafé), y en 2013, como docente investigadora en la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, en el área de cultivos de trópico alto; posteriormente, en 2020 se vinculó como investigador PhD a la Red de Innovación de Cacao de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Actualmente se desempeña como investigadora posdoctoral en Cenipalma. Su trabajo ha estado enfocado en la búsqueda e incorporación de fuentes de resistencia a enfermedades limitantes en los cultivos de café, cacao y palma de aceite. Ha publicado artículos científicos en revistas indexadas sobre temas trabajados en los cultivos relacionados.

Danilo Augusto Monsalve García

Correo electrónico: dmonsalveg@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2710-6302>

Ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia. Realizó sus estudios de maestría en Ciencias Agrarias con énfasis en Genética y Mejoramiento Vegetal en la misma universidad. Se desempeña como investigador en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) desde 2010, en proyectos relacionados con las especies cacao, caucho y aguacate, principalmente con la identificación, selección y evaluación de genotipos superiores. Asimismo, trabaja en el desarrollo y ajuste de índices de selección por rendimiento y estabilidad. Es miembro de la Red de Innovación de Cacao de AGROSAVIA.



Glosario

Colección núcleo: conjunto de accesiones que representa la diversidad genética de una especie vegetal con un grado bajo de redundancia.

Compatibilidad sexual: posibilidad de un individuo, entendido como una planta con un genotipo específico, de recibir polen de otro individuo, y de esta manera formar frutos.

Cultivar: plantas cultivadas que han sido modificadas a partir de métodos de mejoramiento genético. Se utiliza para referirse a variedades, líneas, híbridos y clones que puedan utilizarse como materiales comerciales para siembra.

Fenotipo: conjunto de caracteres visibles que un individuo presenta como resultado de la interacción entre su genotipo y el medio.

Genotipo: información genética que tiene un organismo en particular.

Híbridos: plantas obtenidas del cruzamiento entre dos individuos.

Interacción genotipo × ambiente: desempeño diferencial de los genotipos cuando están en ambientes variables.

Mejoramiento genético: ciencia que busca desarrollar nuevas variedades y en la cual se usan estrategias para la acumulación de alelos favorables para atributos de interés como productividad, resistencia a plagas y enfermedades, tolerancia a factores abióticos e incremento de la calidad.

Oferta tecnológica: tecnologías, productos y servicios generados a partir de los resultados de I+D+i validados (con criterios como promesa de valor, viabilidad económica, acceso al mercado y tamaño de mercado), que tienen utilidad

y valor para los sistemas agropecuarios colombianos. Se incluyen productos, servicios y tecnologías.

Premejoramiento: primeras etapas del aprovechamiento de los recursos genéticos. Contempla la caracterización fenotípica y genotípica de colecciones de germoplasma, con el objetivo de identificar características de interés en accesiones que puedan usarse en programas de mejoramiento genético.

Progenie: individuos descendientes de un cruzamiento entre un árbol madre y un árbol padre.

Selección recurrente: estrategia de mejoramiento genético cíclica que tiene como objetivo incrementar la frecuencia de alelos favorables a través de cruzamientos entre individuos con atributos de valor en repetidos ciclos de selección.

Variedad: conjunto de individuos botánicos que se distinguen por determinados caracteres morfológicos y fisiológicos. Taxonómicamente la variedad se encuentra por debajo de la subespecie.

Variedad clonal: conjunto de plantas genéticamente idénticas obtenidas a partir de métodos de reproducción asexual como injertación, acodos y tejido de cultivos.

Vigor híbrido: capacidad de los híbridos de presentar atributos agronómicos superiores al de los progenitores en cuanto a productividad, resistencia a limitantes fitosanitarias, entre otros.

Prefacio

El cultivo de cacao representa una fuente de ingresos importante para aproximadamente 52.000 familias en Colombia, en especial, para pequeños agricultores con una media de rendimiento nacional que no supera los 500 kg/ha de grano seco. No obstante, el país tiene potencial para incrementar el rendimiento debido a la amplia riqueza de recursos genéticos con la que cuenta, además de ser considerado uno de los más biodiversos a nivel mundial. Recientemente, el comité de la Organización Internacional de Cacao (IcCO, por su sigla en inglés) ratificó a Colombia como productor de cacao de fino sabor y aroma en un 95 %. Esta clasificación representa una oportunidad importante para posicionarse en mercados internacionales de chocolatería fina. La historia de la investigación acerca del cacao en Colombia, arraigada a la cultura de su gente y en muchas ocasiones a los cambios políticos y sociales del país, ha contado con la participación de diferentes actores del sector público y del privado. La Campaña Nacional del Cacao, impulsada por el Gobierno colombiano a comienzos de la década de los cincuenta, promovió las actividades de colecta de germoplasma de cacao en el país, y de esta manera fomentó el crecimiento del cultivo en Colombia. La amplia diversidad genética de cacao que presenta el país ha hecho posible la selección de germoplasma promisorio, en algunos casos en el marco de programas de mejoramiento genético.

Los programas de mejoramiento genético vegetal contribuyen a la sostenibilidad de los sistemas productivos brindando genotipos mejorados, adaptados a las condiciones ambientales y que responden a las demandas del sistema y del mercado. Estos programas deben establecer objetivos claros para obtener materiales mejorados que puedan ser ofrecidos a los productores. En este proceso, es importante tener en cuenta que el mejoramiento debe propender hacia la ganancia genética y asegurar el uso de la diversidad con la que se cuenta. El mejoramiento genético de una especie perenne, como el cacao, es un proceso a largo plazo que requiere ciclos de selección de más de una década y que lamentablemente adolece de continuidad en su financiación; por esto,

el trabajo articulado entre diferentes instituciones es clave para favorecer el avance en los programas de mejoramiento genético de este tipo de especies y, por ende, la obtención de cultivares que representen una alternativa de solución a limitantes de la producción. Este libro tiene como objetivo socializar el programa actual de mejoramiento genético de cacao llevado a cabo por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), a partir de un breve recorrido que permite conocer el sistema productivo, sus principales limitantes, los objetivos y la estrategia del programa actual.

A lo largo de este documento se resalta la participación de diferentes actores y sus aportes a la investigación en algunos temas estratégicos del cultivo de cacao en Colombia. Los autores expresan disculpas a los equipos cuyos trabajos no fueron incluidos por tema de espacio. Así, este documento busca extender una invitación a otras instituciones colombianas, con programas de mejoramiento genético de cacao en curso, a aunar esfuerzos para construir juntos un programa de mejoramiento genético nacional de cacao que beneficie al productor colombiano, y así contribuir al mejoramiento de su calidad de vida y producción, de conformidad con la política de integración nacional fomentada en el país.



0621



Introducción

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es una especie cuyo origen se asocia a la región de bosque tropical húmedo de América del Sur, de las regiones del Amazonas y del Orinoco (Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao], 2013).

El cultivo de cacao es una de las apuestas actuales del Gobierno colombiano para el posconflicto y la erradicación de cultivos utilizados con fines ilícitos. El país cuenta con 188.370 ha cultivadas de cacao (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR], 2021) y una producción de 69.040 toneladas de grano seco registradas en el año cacaotero 2021 (de octubre 2020 a septiembre 2021), lo que representa un 8,9% de incremento respecto a la producción del año anterior. Los departamentos más productores de cacao a nivel nacional, según las cifras de producción de 2021, son, en orden: Santander, Arauca, Antioquia, Tolima, Huila y Nariño (Fedecacao, 2022) (figura 1).

Colombia dispone de una amplia diversidad genética de cacao en la Colección Colombiana de Germoplasma de Cacao y en colecciones de trabajo (Osorio-Guarín et al., 2017), recursos importantes que se utilizan en el Programa de Mejoramiento Genético de Cacao. En el país, se han llevado a cabo caracterizaciones morfo-agronómicas y moleculares de las colecciones de germoplasma de cacao, las cuales han resaltado la riqueza genética con la que cuenta el país (Osorio-Guarín et al., 2020; Ruiz Erazo, 2014; Osorio Guarín, 2009; Sánchez et al., 2007).

Las primeras expediciones de colecta de material genético de *T. cacao* se remontan a la década de los cuarenta, de las cuales se establecieron las primeras colecciones de germoplasma que fueron codificadas como selección cacao Palmira (scp), selección cacao Cauca (scc) y selección cacao Tuluá (sct), establecidas en lo que anteriormente se conocía como la Estación Experimental de Palmira, ubicada en el Valle del Cauca (Oicatá López, 1986; García, 1997). A comienzos de la década de los cincuenta, el entonces Ministerio de

Agricultura y Ganadería promovió la Campaña Nacional de Cacao, la cual fomentó la continuidad en las expediciones de colecta de material genético en diferentes regiones del país (Baker et al., 1953). Los primeros programas de mejoramiento genético de cacao evaluaron híbridos (familias de hermanos completos) obtenidos a partir de cruzamientos entre material regional e introducido (Ocampo & Correa, 1978), haciendo un amplio uso de accesiones introducidas al país (Ocampo et al., 1987). La historia del mejoramiento genético de cacao en Colombia fue recopilada y descrita más ampliamente por Rodríguez-Medina et al. (2019).

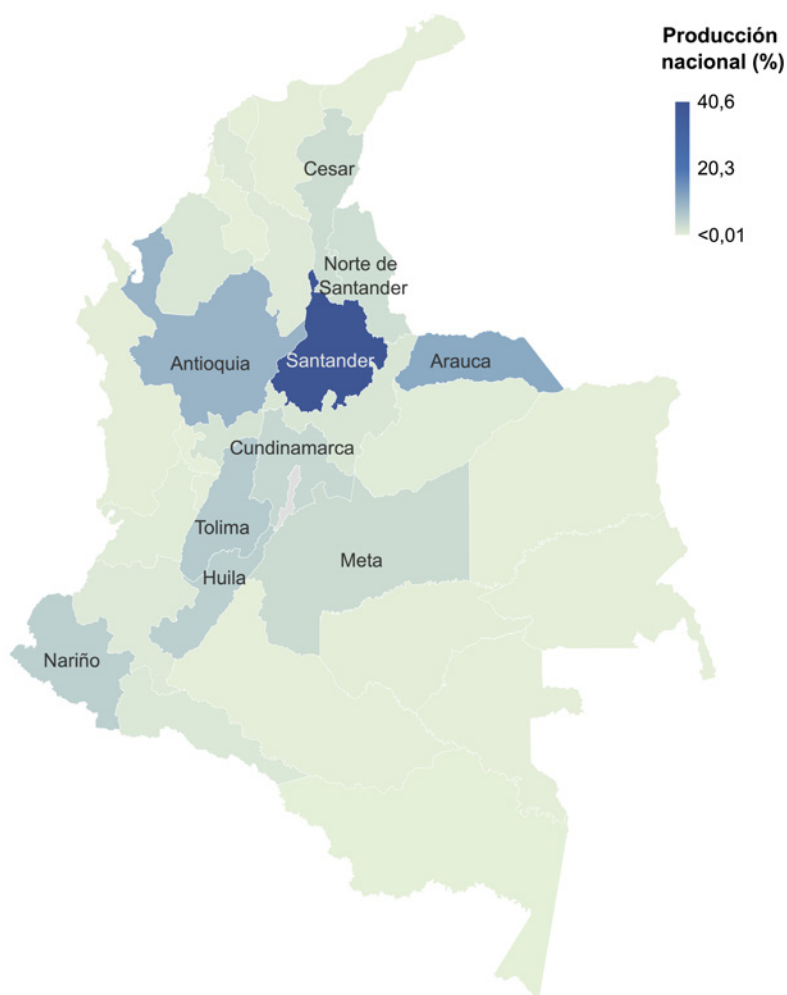


Figura 1. Producción en porcentaje de grano seco de cacao en Colombia, según las cifras de producción en 2021 publicadas por Fedecacao (2022).

Fuente: Roxana Yockteng, a partir de las cifras de producción publicadas por Fedecacao (2022)

La recomendación en Colombia era inicialmente utilizar híbridos como material de siembra (Ocampo et al., 1987). A partir de la década de los noventa se incentivó la identificación, en predios de productores, de árboles promisorios de alto rendimiento y resistentes a enfermedades, lo cual resultó en el fomento y la distribución de clones a los agricultores como nuevo material de siembra (Perea et al., 2013; Palencia C. et al., 2008).

A partir de 2012, la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) comenzó un programa de recombinación genética entre accesiones promisorias del banco de germoplasma, y posteriormente adoptó una estrategia a largo plazo para obtener poblaciones mejoradas de parentales promisorios, como fuentes de alelos favorables, mediante el establecimiento de una estrategia de selección recurrente (SR); es decir, mediante ciclos continuos de recombinación y selección (Rodríguez-Medina et al., 2019). Además, con el fin de crear una colección núcleo a partir de la identificación de las mejores accesiones para ser utilizadas como parentales en el programa de SR, se han realizado actividades de premejoramiento que incluyen caracterizaciones moleculares para evaluar la diversidad genética conservada en los bancos de germoplasma de cacao (Osorio-Guarín et al., 2017, 2020). Estas evaluaciones moleculares han tenido dos propósitos: primero, evaluar si las accesiones conservadas representan la diversidad de la especie y determinar la redundancia de la colección y, segundo, realizar una evaluación molecular más profunda para desarrollar marcadores que permitan seleccionar plantas con características agronómicas sobresalientes. Este trabajo está acompañado de una caracterización fenotípica de las accesiones del banco de germoplasma y de colecciones de trabajo, en la cual se evalúa la incidencia de enfermedades y producción de frutos (Osorio-Guarín et al., 2020). De esta manera, se identifican las accesiones con mejores características para crear colecciones núcleo que puedan usarse en la identificación de parentales en cada ciclo de recombinación genética de la estrategia de SR. La combinación de datos moleculares y fenotípicos permiten hacer estudios de asociación genómica para detectar marcadores moleculares que pueden utilizarse como apoyo al mejoramiento genético convencional, en la identificación de genotipos con atributos agronómicos de interés como resistencia a enfermedades.

El uso de variedades mejoradas de cacao, en combinación con prácticas agronómicas apropiadas y sistemas agroforestales idóneos para las condiciones agroecológicas locales, permitirá aumentar los rendimientos y disminuir

la pérdida por factores de estrés biótico y abiótico, lo que repercutirá en la calidad de vida de los productores, así como de los otros integrantes de la cadena cacao-chocolate.

El objetivo de este libro es socializar el programa actual de mejoramiento genético de cacao establecido en AGROSAVIA, extendiendo una invitación a otras instituciones nacionales, que también se encuentran en la actualidad desarrollando actividades de mejoramiento, a aunar esfuerzos para construir juntos un programa de mejoramiento genético nacional de cacao que beneficie al productor con materiales de siembra productivos, con resistencia a limitantes fitosanitarias y tolerancia a factores de estrés abiótico. Esta iniciativa responde a la actual política de integración nacional, la cual reconoce diferencias regionales que se aprovechan para crear estrategias de articulación que permitan fortalecer componentes sociales, económicos y productivos en el país. En este documento, se relacionan las principales limitantes del sistema productivo de cacao en Colombia, los objetivos del programa y la estrategia de mejoramiento genético adoptada actualmente por AGROSAVIA.

Limitantes de la producción y la calidad en Colombia

El cultivo de cacao en Colombia enfrenta algunas limitantes que afectan la producción y la calidad del grano seco, entre ellas está la incidencia de enfermedades, el envejecimiento de las plantaciones, el manejo agronómico inadecuado, la incompatibilidad sexual, las bajas poblaciones de polinizadores, la presencia de cadmio en suelo en algunas regiones del país y las prácticas inadecuadas en procesos de poscosecha. A continuación, se relacionan algunas de estas limitantes

Enfermedades e insectos plaga

Una de las principales limitantes del cultivo del cacao en Colombia es la incidencia de enfermedades (Alarcón Restrepo et al., 2012); dentro de estas se encuentra la monilia (figura 2a), causada por el hongo *Moniliophthora roreri* (Compañía Nacional de Chocolates, 2019a; Grisales Ortega & Afanador Kafur, 2007; Jaimes et al., 2016; Sáenz, 2007; Suárez-Contreras, 2016), que tiene la particularidad de ser una enfermedad exclusiva del fruto y puede ocasionar pérdidas del 40 % al 100% (Correa Álvarez et al., 2014). Unos de los síntomas más característicos de la enfermedad son las deformaciones y los abultamientos en frutos jóvenes de menos de dos meses, y los frutos mayores de tres meses presentan puntos aceitosos y manchas de color marrón que posteriormente se cubren de esporas del hongo y forman una capa de color crema (Alarcón Restrepo et al., 2012) (figura 2a).

Otra enfermedad de alta incidencia es la escoba de bruja, causada por el hongo *Moniliophthora perniciosa* (Osorio-Solano et al., 2012; Tovar & Ortiz., 1991) (figura 2b), el cual afecta cojines florales, frutos y yemas vegetativas. La enfermedad recibe su nombre debido a la formación de tejidos que parecen “escobas”, que se desarrollan por la infección de cojines florales y yemas terminales y axilares. También es posible observar algunos hinchamientos

de los nudos y formación de frutos con forma de fresa o zanahoria (Bailey & Meinhardt, 2016). Otra limitante fitosanitaria de relevancia es la mazorca negra causada por *Phytophthora* sp. (Cárdenas Pardo et al., 2017; Palacios-Bejarano et al., 2021) (figura 2c), que llega a ocasionar pérdidas superiores al 10 % (Ramírez Gil, 2016). Este patógeno puede infectar todos los órganos de la planta de cacao y su incidencia está correlacionada con alta humedad relativa y bajas temperaturas (Rodríguez Polanco & Vera Rodríguez, 2015); en algunas regiones, se presenta además incidencia de llagas radicales (*Rosellinia* sp.) (Cárdenas López et al., 1999) y mal del machete (*Ceratocystis* sp.) (Van Wyk et al., 2010). Patógenos como *Lasiodiplodia theobromae* comienzan a ganar importancia en algunas zonas productoras de cacao del país (Amortegui Novoa & Becerra Betancourt, 2019).

En el caso de insectos plaga, se resalta *Monalonion* sp. (Figueroa Potes, 1952), además de insectos perforadores del fruto de cacao, como *Carmenta foraseminis* y *Carmenta theobromae* (Carabalí et al., 2018; Vásquez Castañeda et al., 2015; Cubillos, 2013). Se han reportado pérdidas de alrededor del 30 % del grano comercial debido al ataque de *C. foraseminis* (Cubillos, 2013) (figura 2d), el cual ocasiona daños en las semillas del fruto, mientras que *C. theobromae* generalmente afecta solo el mesocarpio y rara vez se presentan daños en las semillas (Carabalí et al., 2018). Algunos estudios se han orientado hacia el control biológico de *C. foraseminis*, sugiriendo el potencial de *Beauveria bassiana* para el desarrollo de bioinsecticidas (Dávila, 2019).



Figura 2. Limitantes fitosanitarias del cultivo de cacao en Colombia. a. Frutos afectados por *Moniliophthora roreri*; b. Cojín floral afectado por *Moniliophthora perniciosa*; c. Fruto afectado por *Phytophthora* sp.; d. Fruto afectado por *Carmenta foraseminis*.

Fotografías: Caren Rodríguez-Medina, Diana Milena Rodríguez Mora, Arturo Carabalí Muñoz

Estas limitantes fitosanitarias varían en incidencia en función de la disponibilidad de ambientes favorables para su desarrollo y del manejo de las plantaciones por parte del productor. La resistencia a monilia ha sido observada en clones comerciales internacionales como ICS 95 y CCN 51, este último con resistencia parcial (Jaimes et al., 2011). Algunos clones comerciales regionales como FEC 2, CAU 39 (Perea et al., 2013) y TCS 06 (AGROSAVIA, 2014) también han mostrado baja incidencia de esta enfermedad. Aunque se han generado recomendaciones de manejo agronómico para controlar plagas y enfermedades (Aranzazu Hernández & Jaimes Suárez, 2010; Carabalí et al., 2018; Rodríguez Polanco et al., 2020; Rodríguez Polanco & Vera Rodríguez, 2015; Tirado-Gallego et al., 2016), la diversidad de las condiciones de cultivo limita su difusión y adopción por parte de los productores. Por lo tanto, existe una necesidad urgente de desarrollar variedades que incorporen fuentes de resistencia a limitantes fitosanitarias del cultivo de cacao en el país. Dentro de los avances desarrollados por AGROSAVIA se han identificado accesiones conservadas en las colecciones de germoplasma con resistencia promisoría a algunas enfermedades del cultivo (Osorio-Guarín et al., 2020). Además, a partir de técnicas de *genotyping by sequencing* (GBS), se han identificado polimorfismos de un solo nucleótido (SNP, por sus siglas en inglés) asociados a la resistencia a monilia y escoba de bruja (Osorio-Guarín et al., 2020), los cuales pueden ser utilizados para apoyar la selección de genotipos con resistencia a estos patógenos.

Manejo agronómico

El manejo del sistema productivo del cacao varía ampliamente en el país en función del nivel de tecnología adoptada por el productor, lo cual puede estar relacionado con el sistema de financiación y poder adquisitivo; también influye el régimen de tenencia de la tierra y la importancia del cultivo de cacao dentro de los planes de desarrollo local y la economía regional (Charry et al., 2019). Las condiciones de manejo pueden variar en función de las características edafoclimáticas de cada zona de producción, y es recomendable establecer un paquete de manejo agronómico para los cultivares sugeridos para cada subregión agroecológica.

Abbott et al. (2018) clasificaron a los productores de cacao colombianos en cuatro tipologías:

Marginal: se caracterizan por presentar rendimientos bajos; las plantaciones están ubicadas en zonas no aptas para el cultivo con un limitado manejo agronómico.

Tradicional: la mayoría de los productores colombianos hacen parte de esta tipología, se ubican en zonas con mejor aptitud agroecológica, aunque las prácticas de manejo agronómico son aún limitadas; se llevan a cabo algunas actividades de fertilización, poda y manejo fitosanitario principalmente de tipo curativo.

Tecnificado: los productores tienen un mayor poder adquisitivo y cuentan con una mejor adopción de tecnología que se refleja en mayores rendimientos.

Diversificado: se refiere a los productores que cuentan con plantaciones que incluyen varios componentes productivos, lo que favorece la seguridad alimentaria.

Teniendo en cuenta las anteriores tipologías de productores, se requiere una oferta de tecnología diversificada que responda tanto a la tipología de productor como a la diversidad edafoclimática del país. La oferta tecnológica puede ser de bajo costo de inversión y estar dirigida a productores con capacidad de inversión limitada. Otro tipo de tecnología podría ser más costosa y exigente en su implementación, destinada a productores que logran manejar las exigencias de su uso; por ejemplo, en términos de fertilización, se pueden recomendar niveles que permitan el mayor potencial de productividad o mantener un nivel constante de fertilidad del suelo, solamente compensando la toma de los elementos por parte de los árboles durante la etapa de llenado de frutos.

Además de contemplar el tipo de tecnología que se disponga para cada tipología de productor, existe también la necesidad de evaluar, seleccionar y producir variedades de cacao adaptadas localmente para un mejor aprovechamiento de la oferta agroclimática.

Los productores tradicionales de cacao, según la tipología de Abbott et al. (2018), combinan el cultivo de cacao con plátano, árboles frutales como cítricos y árboles forestales nativos y algunos maderables. Sin embargo, estos sistemas agroforestales (SAF) tradicionales de cacao requieren un mejor manejo agro-

nómico del que actualmente reciben. Se observa en los SAF tradicionales que las distancias de siembra por lo general son poco apropiadas y en algunos casos se presenta competencia entre los diferentes elementos del sistema, que resulta en rendimientos bajos.

En línea con lo descrito anteriormente, es importante que los SAF sean adecuados para la región en la que se implementen; es necesario tener en cuenta el tipo de productor, sus características socioeconómicas, de mercado y las condiciones edafoclimáticas de la región (Rodríguez Giraldo et al., 2022). De acuerdo con esto, en un estudio realizado en la región del Pacífico colombiano, se definió la densidad de siembra óptima en SAF; según las conclusiones del estudio, 625 plantas por hectárea fue la densidad de siembra más recomendada para la región. Aunque esta densidad de siembra se encuentra por debajo de la recomendada para la mayoría del país, representó la mejor alternativa para maximizar la rentabilidad del sistema productivo bajo las condiciones edafoclimáticas y socioeconómicas de la región del Pacífico colombiano (Pérez-Zúñiga et al., 2021). Diferentes SAF en cacao han sido estudiados para mejorar la fertilidad del suelo en Colombia (Ballesteros-Possú et al., 2022; Rangel-Mendoza & Silva-Parra, 2020; Rodríguez Suárez et al., 2021). Los SAF con cacao no solo tienen el potencial de incrementar los rendimientos, sino que también constituyen una herramienta clave para mitigar el cambio climático, gracias a los servicios ecosistémicos que ofrecen como captura de carbono (Ballesteros-Possú et al., 2022; Compañía Nacional de Chocolates, 2021a).

Limitantes en poscosecha

En el país se han identificado limitantes en el manejo de poscosecha del cacao relacionadas con un bajo desarrollo tecnológico, que resultan en una deficiente calidad del grano ofertado y en el poco conocimiento de la importancia del proceso de beneficio y de los parámetros de calidad por parte de productores y comercializadores (Contreras Pedraza, 2017; Enríquez Fajardo, 2020; Escobar et al., 2020; Sánchez Vargas et al., 2008; Santander Muñoz et al., 2019). Como respuesta a estos limitantes, se han llevado a cabo estudios orientados a mejorar los procesos de poscosecha en el país; por ejemplo, un estudio de AGROSAVIA presenta una hoja de ruta con el objetivo de generar estrategias tecnológicas en los procesos de cosecha, poscosecha y comercialización en función de la calidad, que permite responder a los requerimientos

de los mercados especializados (Contreras Pedraza, 2017; Escobar et al., 2020). A partir de este estudio, AGROSAVIA continuó su investigación con el fin de transformar las semillas a grano de cacao fino y de aroma para lograr que los productores sean más competitivos (Becerra et al., 2021; Santander et al., 2019).

Se han desarrollado metodologías para estandarizar la fermentación bajo un modelo de transformación de poscosecha centralizado en la asociatividad (Escobar et al., 2021). Asimismo, se han controlado variables del proceso de fermentación, lo cual permite incidir en la producción de grano de cacao fino y de aroma, incluso en variedades comerciales no consideradas tipo fino y de aroma (Santander et al., 2021). En la actualidad, AGROSAVIA trabaja para implementar esta tecnología a mayor escala (Becerra et al., 2022, 2023).

Además, se han generado, por parte de diferentes actores, manuales para un correcto beneficio del cacao, con el objetivo de mejorar la calidad del grano (Cerón et al., 2020). Por ejemplo, se tiene el manual desarrollado por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de Antioquia, la Compañía Nacional de Chocolates, la Corporación para Investigaciones Biológicas y la Universidad de Antioquia (Cubillos et al., 2008), en el cual se describen las operaciones de cosecha y desgrane, fermentación, secado, selección, clasificación, empaque y almacenamiento recomendadas para mejorar la calidad del grano de cacao ofertado. En 2019, la Compañía Nacional de Chocolates publicó una versión más actualizada con recomendaciones para las operaciones de poscosecha (Compañía Nacional de Chocolates, 2019b).

La genética es otro de los factores que contribuye a la calidad del grano de cacao (Deus et al., 2020; Figueira et al., 1997), por lo que es pertinente incluir características sensoriales y químicas del cacao en el proceso de caracterización de germoplasma, contemplado en el marco de programas de mejoramiento genético.

Limitantes de la polinización

La polinización es un aspecto clave y potencialmente limitante en el rendimiento del cultivo de cacao, teniendo en cuenta que aproximadamente el 95 % de las flores se cae después de la floración, y solo el 5 % logra la fecundación y formación de fruto (Aranzazu Hernández et al., 2008; Toledo-Hernández et al., 2020). La especie cacao se caracteriza por tener flores caulescentes distribuidas

en el tronco y ramas primarias principalmente (López et al., 2021); a pesar de tener flores hermafroditas, su morfología floral impide la autopolinización debido a que presenta estambres y estaminodios parcialmente encapsulados por el crecimiento de pétalos. La polinización es mediada, en especial, por insectos del género *Forcipomyia* (dípteros) y es de preponderancia alógama (Knight & Rogers, 1953, 1955). En Colombia, en la década de los setenta, se llevaron a cabo estudios que asociaron la polinización natural a este díptero y evidenciaron escasez de polinizadores con relación al número de flores y la tasa de polinización diaria (De la Cruz & Soria, 1973; Soria, 1971), también se reportaron otros insectos dípteros visitantes como *Artrichopogon*, *Dasyhelea* y *Stilobezzia*.

Otra limitante para la producción es la incompatibilidad sexual, la cual es consecuencia de dos mecanismos asociados: la migración incompleta del núcleo espermático, lo que no le permite llegar al núcleo femenino (Ford & Wilkinson, 2012), y la ausencia de fusión de los gametos (Cope, 1958). El control genético de la incompatibilidad parece estar asociado a la presencia de un locus S y cinco alelos con relación de dominancia entre ellos: $S1 > S2 = S3 > S4 > S5$ (Cope, 1962). Una de las estrategias adoptadas contra esta limitante consiste en el establecimiento de diseños de siembra con clones intercompatibles (Aranzazu Hernández et al., 2008; Phillips-Mora et al., 2013).

Dentro de los clones autocompatibles, actualmente con registro ICA, se encuentran TCS 01, TCS 13, TCS 19 (Agudelo Castañeda et al., 2017; Báez Daza et al., 2022), FSV 41, FSV 155, FEAR 5, FTA 2 (Perea et al., 2013), CNCh 12 y CNCh 13 (Compañía Nacional de Chocolates, 2021b), y dentro de los clones con autoincompatibilidad están TCS 06, FSA 13, FEC 2, FLE 2, FLE 3 y FSA 12 (Perea et al., 2013).

Contaminación por metales pesados

Además de la toma de elementos nutritivos presentes en el suelo, el cacao también puede absorber y acumular elementos pesados como el cadmio (Cd); estos metales son translocados a la semilla y representan un riesgo para la salud humana (Maddela et al., 2020). Como consecuencia, a partir del 1.º de enero de 2019 entró en vigor una nueva legislación (n.º 488 de 2014) para las importaciones a la Unión Europea de cacao y sus derivados (European Commission, 2014). El uso de genotipos de cacao que acumulen menos Cd

ha sido sugerido en varios estudios como una alternativa de solución a la presencia de Cd disponible en el suelo; esto evita que se convierta en una limitante para su comercialización (Engbersen et al., 2019; Lewis et al., 2018).

Se han llevado a cabo diferentes estudios en Colombia en torno a la presencia de Cd en suelos de regiones productoras del grano en el país. En una iniciativa por aunar esfuerzos de diferentes instituciones, se estableció una alianza entre AGROSAVIA, Fedecacao, CasaLuker, la Universidad Eafit, la Universidad de Medellín, la Institución Universitaria Pascual Bravo, la organización Swisscontact y la Universidad de Santander (UNDES), las cuales desarrollaron tres cartillas que abordan conceptos básicos del Cd, su origen, su presencia en el suelo, los aportes a la investigación en Cd en el país, así como recomendaciones de fertilización, enmiendas y microorganismos, además del plan de acción del Gobierno nacional y de diferentes actores de la cadena cacao-chocolate ante la problemática de la presencia del Cd en regiones productoras de cacao (Bravo et al., 2021a).

El contenido de Cd en suelo en Colombia, así como en diferentes órganos de la planta, incluida la hojarasca, ha sido estudiado y se ha correlacionado el contenido de Cd con características fisicoquímicas del suelo (Aguirre-Forero et al., 2020; Bravo et al., 2021b; Gil et al., 2022; Rodríguez Albarracín, 2017). El uso de microorganismos como estrategia de fitorremediación de suelos con niveles de Cd disponibles para la planta de cacao, como es el caso de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) (Fernández Lizarazo & Rodríguez Villate, 2019; Jácome Molina, 2018; Pérez Moncada et al., 2019) y bacterias tolerantes al Cd con capacidad de inmovilización del metal pesado (Bravo et al., 2018), también ha sido reportado en el país.

En Colombia, se han estudiado diferentes métodos para la cuantificación del elemento químico (Bravo & Benavides-Erazo, 2020; Niño Bernal, 2015; Rodríguez et al., 2022), así como el efecto del Cd en la fisiología de la planta, y se ha observado un efecto sobre la eficiencia fotosintética y el crecimiento de las plantas, que varía según el genotipo de cacao (Fernández-Paz et al., 2021; Sandoval, 2019). El efecto de procesos de poscosecha en la cantidad de Cd en productos terminados ha sido recientemente estudiado, y se ha encontrado que los tratamientos de poscosecha no reducen el contenido de Cd en granos de cacao (Bravo et al., 2022).

El cacao en Colombia se siembra como una combinación de dos genotipos, uno en la copa y otro que juega el rol de portainjerto. Teniendo en cuenta el efecto del portainjerto de cacao en la expresión de algunos atributos de interés de la copa, como el vigor (Yin, 2004) y la resistencia a enfermedades (Ribeiro et al., 2016), el efecto del portainjerto en la acumulación de Cd también ha sido estudiado en el país y se ha encontrado un efecto de la interacción copa $\times$ portainjerto $\times$ suelo en la acumulación de Cd en la planta de cacao (Fernández-Paz et al., 2021). Estos resultados indicaron la importancia de evaluar el comportamiento agronómico de copas y portainjertos en combinación.



Programa de Mejoramiento Genético de Cacao

Los clones comerciales de cacao registrados actualmente ante el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) provienen de la selección participativa de árboles élite en predios de productor (Agudelo Castañeda et al., 2017; Arguello Castellanos et al., 1999; Compañía Nacional de Chocolates, 2021b; Perea et al., 2013). Sin embargo, aunque este tipo de estrategia ha contribuido a la identificación de genotipos con atributos agronómicos de interés, no garantiza ganancia genética. En un programa de mejoramiento genético, el conocimiento de parámetros como la aptitud combinatoria general y específica de los individuos base, además de la heredabilidad de atributos agronómicos de interés, constituye herramientas clave para el establecimiento de programas de mejoramiento con una mejor base genética.

A partir de 2012, AGROSAVIA comenzó un programa de recombinación genética entre accesiones promisorias del banco de germoplasma, y en 2016 adoptó la SR como estrategia de mejoramiento a largo plazo. Esta estrategia está orientada hacia la ganancia genética a través del tiempo y hacia el uso de la diversidad con la que se cuenta (Rodríguez-Medina et al., 2019). Dado que un programa de mejoramiento genético debe establecer objetivos claros para obtener materiales mejorados que puedan responder a las necesidades de los productores y del mercado, se relacionan a continuación los objetivos de la estrategia de mejoramiento genético adoptada por AGROSAVIA.

Objetivo general

Asegurar el aprovechamiento de los recursos genéticos disponibles con el fin de ofrecer variedades mejoradas que, en combinación con prácticas agrícolas apropiadas, permitan incrementar la producción, disminuir la pérdida por factores de estrés biótico y abiótico, y que además faciliten el acceso a los mercados nacional e internacional.

Objetivos específicos

- Obtener variedades productivas de cacao de fino aroma y sabor, resistentes a las principales limitantes fitosanitarias, tolerantes a factores de estrés abiótico y de menor acumulación de metales pesados.
- Obtener portainjertos de cacao resistentes a las principales limitantes fitosanitarias, tolerantes a factores de estrés abiótico y de menor acumulación de metales pesados
- Identificar combinaciones copa × portainjerto de cacao que expresen atributos favorables tanto del portainjerto, como de la copa.

Premejoramiento

En programas de mejoramiento genético es importante tener conocimiento de las poblaciones base utilizadas, en aras de facilitar la selección de los parentales. El premejoramiento se refiere a las primeras etapas para aprovechar los recursos genéticos; el objetivo es contribuir a la utilización de la diversidad genética a partir de la caracterización y evaluación de las colecciones de germoplasma, que permitan incorporar al programa genotipos con características favorables.

El alto Amazonas colombiano hace parte de la región de origen de *T. cacao* y, como país de origen, Colombia cuenta con una gran fuente de diversidad genética de la especie (Thomas et al., 2012). Los recursos genéticos con los que cuenta el país se conservan en el banco de germoplasma de la nación y en colecciones de trabajo en centros de investigación de AGROSAVIA, del gremio, de institutos de investigación y de la industria privada. El germoplasma conservado en AGROSAVIA es un patrimonio de la nación y está compuesto tanto por accesiones colectadas en Colombia como por introducidas al país. Se conservan 514 accesiones en dos centros de investigación de AGROSAVIA: en Palmira, donde se estableció la primera colección y se conservan 514 accesiones, y en La Suiza, donde se conservan 463. Además, se conservan 12 accesiones de la especie hermana de cacao *Theobroma grandiflorum*, una accesión de *T. bicolor*, una accesión de *T. bernoulli* Pittier y una accesión de *Herrania* sp. Los datos de pasaporte disponibles para la colección indican que la mayoría de las accesiones fueron colectadas en finca de productor (66 % aproximadamente) o corresponden a materiales comerciales introducidos o provenientes de otros

programas de mejoramiento genético (27%). Solo cerca del 7% de la colección proviene de colectas realizadas en regiones silvestres.

El primer estudio de diversidad genética, publicado por Sánchez et al. (2007), utilizó marcadores isoenzimas, RAPD, SSR, RFLP para analizar 100 accesiones del banco de germoplasma conservado en AGROSAVIA. El estudio no mostró mucha diferenciación entre accesiones. Algunos estudios de diversidad genética de germoplasma de cacao en Tumaco, Nariño, mostraron que existe una diversidad genética de la especie importante en esta región (Morillo et al., 2014; Ruiz Erazo, 2014). Osorio-Guarín et al., (2017) incluyeron posteriormente un mayor número de accesiones conservadas en el banco de germoplasma en un estudio de diversidad genética, las cuales correspondían tanto a clones comerciales introducidos, como a materiales colectados en el país. Comparando con los grupos genéticos reconocidos, se mostró que hay una gran diversidad genética y que probablemente en Colombia existen grupos genéticos nuevos que pueden ser utilizados en los programas de mejoramiento.

También se han llevado a cabo actividades de caracterización fenotípica del banco de germoplasma de cacao, lo que ha permitido observar diferencias entre accesiones en productividad e incidencia de monilia y escoba de bruja (Osorio-Guarín et al., 2020). De los materiales caracterizados, se encontraron ocho accesiones con menor incidencia de monilia y cuatro con menor incidencia de escoba de bruja.

En la actualidad, los datos de los bancos de germoplasma de la nación están siendo integrados por AGROSAVIA en la plataforma Grin Global (Germplasm Resource Information Network, ver: <https://www.grin-global.org/>), que fue desarrollada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) y el Global Crop Trust, y que permite el manejo de la información por parte de los curadores de las colecciones. Los datos de pasaporte de la colección de germoplasma de cacao de AGROSAVIA fueron también integrados en esta plataforma (ver: <http://bgvcolombia.agrosavia.co:8026/gringlobal/>). Esto permite el acceso a la información de las accesiones y la integración de datos fenotípicos y datos de pasaporte.

Los programas de mejoramiento genético también pueden hacer uso de plataformas que faciliten el registro y acceso a la información de los parentales, progenies y parámetros genéticos; además, permiten la colaboración entre

instituciones para el desarrollo de programas de mejoramiento genético de especies en común. Con algunas plataformas es posible simular la estrategia de mejoramiento establecida, lo que permite conocer las tasas de ganancia genética y de “*varietal turnover*”, y al mismo tiempo tener un buen manejo del *pedigree*, de las poblaciones y de los lotes experimentales en evaluación. Con estas plataformas se pueden compartir datos con otras instituciones dedicadas al mejoramiento genético. La adopción de una herramienta como esta representaría una excelente oportunidad para el país de modernizar el programa nacional de mejoramiento genético de cacao, dado que así se establecería un programa de mejoramiento colaborativo entre instituciones que pueda ofrecer resultados de forma más eficiente al productor colombiano. Se conocen diversas plataformas que pueden responder a esta necesidad; una de ellas, de uso libre, es la desarrollada por el Grupo Consultivo sobre Investigación Agrícola Internacional (CGIAR, por sus siglas en inglés) llamada Excellence in Breeding Platform (ver: <https://excellenceinbreeding.org/toolbox/tools/eib-breeding-scheme-optimization-manuals>). Otra plataforma, también de uso libre, es The Breeding Information Management System (BIMS) (ver: <https://gitlab.com/mainlabwsu/bims>), que permite ingresar datos de parámetros genéticos. También hay otras plataformas que responden a las mismas necesidades y que incluyen un costo para su acceso, como Phenom Networks (ver: <https://phenome-networks.com/en/>), Integrated Breeding Platform (Breeding Management System) (ver: <https://bmspro.io/>) y Plant Breeding Software (PRISM) (ver: <https://www.teamcssi.com>).

Para los autores del presente libro, es importante extender una invitación a otras instituciones a aunar esfuerzos en un programa nacional de mejoramiento genético de cacao, con el cual, a partir del uso de este tipo de plataformas, todas las partes aliadas puedan tener acceso a la información del programa nacional de mejoramiento genético de la especie.

Clones comerciales registrados en Colombia

A finales de la década de los noventa se fomentaron varias iniciativas para identificar materiales genéticos regionales promisorios, a partir de métodos de selección participativa, en predios de productor (Arguello Castellanos et al., 1999). Árboles de cacao sobresalientes fueron multiplicados vegetativamente y establecidos en ensayos clonales para evaluar su desempeño agronómico, lo que permitió identificar genotipos con características sobresalientes.

Como parte del fortalecimiento del sector cacaotero, en 2014 se registraron los dos primeros clones por parte de Corpoica (actualmente AGROSAVIA): TCS 01 y TCS 06 (AGROSAVIA, 2019, 2014) (tabla 1). Ese mismo año, Fedecacao registró ocho materiales de cacao para la zona montaña santandereana y piedemonte llanero: FEAR 5, FLE 2, FLE 3, FEC 2, FSA 12, FSA 13, FSV 41 y FTA 2 (Perea et al., 2013) (tabla 1). En 2017, AGROSAVIA amplió el portafolio de clones comerciales con los registros de TCS 13 y TCS 19 (Agudelo Castañeda et al., 2017), mientras que Fedecacao incluyó el clon FSV 155 en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales del ICA para la zona de piedemonte llanero (Fedecacao, 2019). En 2021, la Compañía Nacional de Chocolates (2021b) registró los clones CNCh 12 y CNCh 13 (tabla 1), y Fedecacao registró cinco nuevos materiales, FSV 1, FGI 4, FMA 7, FBO 1, FCHI 8 (Fedecacao, 2021a, 2021b, 2021c, 2021d, 2021e) (tabla 1). La figura 3 ilustra los clones comerciales con registro ICA actualmente en Colombia.

Si bien se han seleccionado diferentes clones de cacao con atributos agronómicos de interés, se requiere la producción de nuevas variedades con destacado rendimiento que respondan a demandas actuales; por ejemplo, factores de estrés abiótico como resultado de los efectos del cambio climático (estrés por sequía o por periodos prolongados de inundación, y altas temperaturas), inocuidad y nuevas limitantes fitosanitarias conservando la calidad química y sensorial.

Tabla 1. Características principales de materiales genéticos incluidos en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales del ICA

Clones con registro ICA	Rendimiento experimental (kg/ha/año)	Índice de grano	Índice de mazorca
CNCh 12	2547	1,52	16
CNCh 13	2056	1,58	12
FBO 1	1375	1,6	16
FCHI 8	1400	1,6	15
FTA 2	1389	1,8	15
FGI 4	1600	1,6	18
FMA 7	1800	1,8	15
FSV 1	1600	2,1	13
FEAR 5	1689	1,6	17
FEC 2	1895	1,6	16
FLE 2	1612	2,0	13
FLE 3	1843	1,6	17
FSA 12	1575	1,30	18
FSA 13	1824	1,3	24
FSV 41	1993	2,1	13
FSV 155	450	1,6	25
TCS 01	3,3 kg/árbol/año	3	9
TCS 06	2,0 kg/árbol/año	2	12
TCS 13	1,5 kg/árbol/año	1,8	14
TCS 19	1,8 kg/árbol/año	1,6	16

* MS: medianamente susceptible; R: resistente; MR: medianamente resistente; S: susceptible.
** AC: autocompatible; AI: autoincompatible.
Fuente: Elaboración propia, a partir de datos de AGROSAVIA (2019, 2014), Agudelo Castañeda et al. (2017), Compañía Nacional de Chocolates (2021b), Fedecacao (2019, 2021a, 2021b, 2021c, 2021d, 2021e), Perea et al. (2013)

Respuesta a <i>Moniliophthora roreri</i> *	Compatibilidad**	Institución de registro
-	AC	Compañía Nacional de Chocolates
-	AC	Compañía Nacional de Chocolates
MR	AI	Fedecacao
MR	AI	Fedecacao
MS	AC	Fedecacao
MS	AC	Fedecacao
S	AI	Fedecacao
MS	AI	Fedecacao
MS	AC	Fedecacao
R	AI	Fedecacao
MR	AI	Fedecacao
MR	AI	Fedecacao
MR	AI	Fedecacao
MS	AI	Fedecacao
S	AC	Fedecacao
MS	AC	Fedecacao
-	AC	AGROSAVIA
-	AI	AGROSAVIA
-	AC	AGROSAVIA
-	AC	AGROSAVIA



Figura 3. Clones comerciales de cacao incluidos en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales del ICA. a. CNCh 12; b. CNCh 13; c. TCS 01; d. TCS 06; e. TCS 13; f. TCS 19; g. Clones registrados por Fedecacao.

Nota: La imagen de clones registrados por Fedecacao fue tomada por el investigador Olivier Sounigo, del Centro de Investigación Palmira de AGROSAVIA, en la granja Villa Mónica de Fedecacao (San Vicente de Chucuri). Las imágenes de los clones CNCh 12 y CNCh 13 son cortesía del Ingeniero Oscar Darío Hincapié Echeverri de la Compañía Nacional de Chocolates. Las imágenes de los clones TCS son cortesía de la ingeniera Ruddy Lizette Huertas Beltrán del Centro de Investigación El Nus de AGROSAVIA.

Estrategia actual de mejoramiento genético de cacao de AGROSAVIA: selección recurrente

La SR es una estrategia cíclica de mejoramiento que se usa para incrementar la frecuencia de alelos favorables de un atributo de interés, a través de cruza-
mientos entre individuos con atributos de valor en varios ciclos de selección (Hull, 1945; Jenkins, 1940). La adopción de SR como nueva estrategia de mejoramiento genético, por parte de AGROSAVIA, está orientada a fomentar la ganancia genética en la selección de clones de alto rendimiento y resistentes a limitantes fitosanitarias. En esta estrategia, se determina la aptitud combi-
natoria de genotipos de interés para la selección de parentales. La figura 4 presenta la estrategia de SR utilizada actualmente por AGROSAVIA.

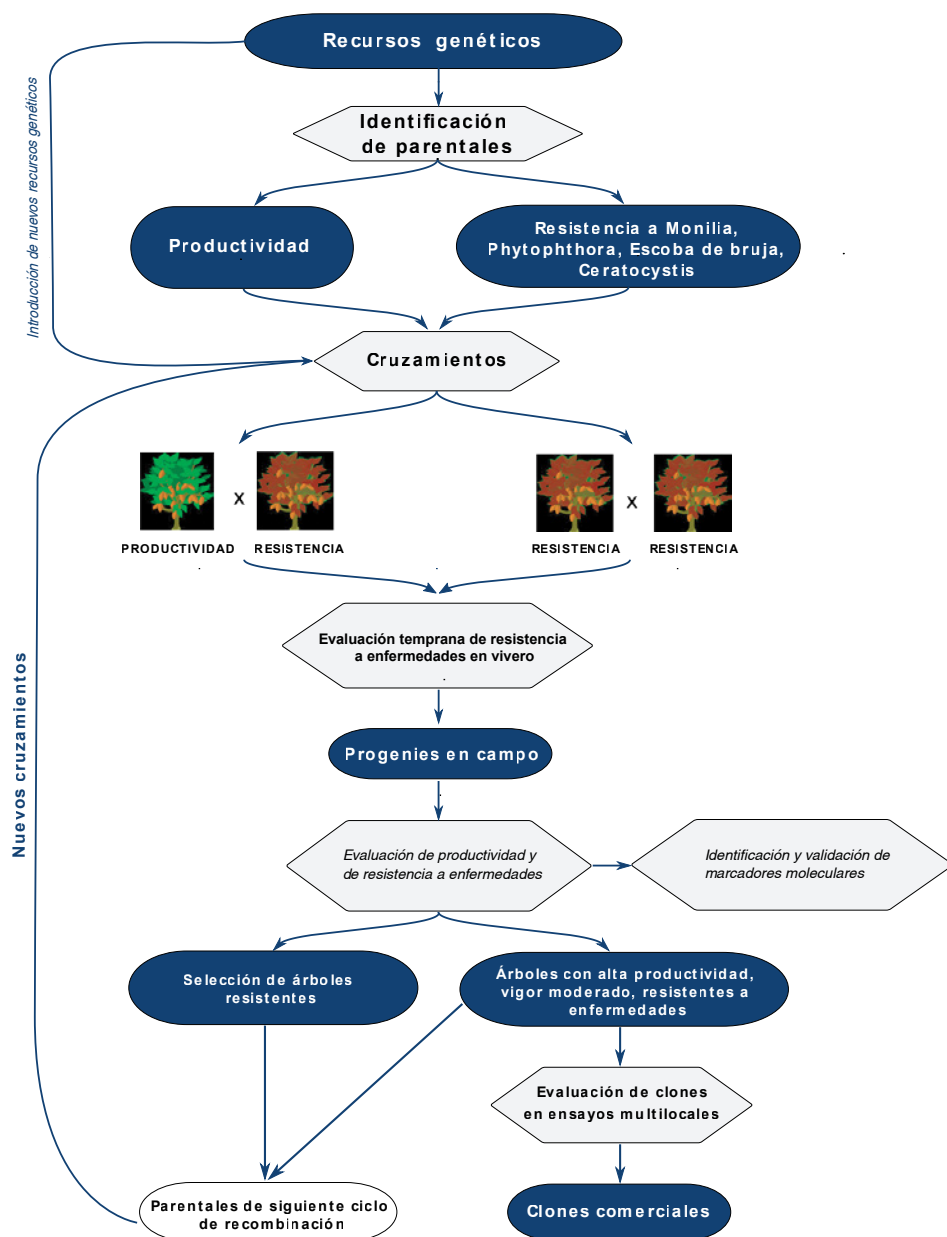


Figura 4. Estrategia de SR empleada actualmente en el Programa de Mejoramiento Genético de Cacao de AGROSAVIA.

Fuente: Elaboración propia

A partir de las actividades de premejoramiento, en las cuales se obtiene información fenotípica y genotípica de las accesiones conservadas en las colecciones de germoplasma, se identifican genotipos élite con atributos de

interés; estos se emplean como parentales en esquemas de cruzamientos que se llevan a cabo a partir de polinizaciones dirigidas, combinando atributos de productividad y resistencia a enfermedades, o acumulando alelos favorables para resistencia a diferentes enfermedades.

Las progenies obtenidas a partir de cruzamientos dirigidos son evaluadas bajo condiciones controladas. Uno de los parámetros incluidos en la evaluación temprana de progenies es la resistencia a enfermedades, que se realiza a partir de inoculaciones artificiales de patógenos que afecten la planta en estado vegetativo. Progenies seleccionadas en vivero son establecidas en campo, donde se evalúan por componentes de productividad y resistencia a enfermedades. Algunos rasgos morfofisiológicos pueden también ser usados durante la selección de parentales por tolerancia a factores de estrés abiótico y biótico (Alban et al., 2016; Nyadanu et al., 2012).

En el programa actual, la aptitud combinatoria general (ACG) de los parentales en relación con algunos atributos de interés, como es el caso de componentes de rendimiento que incluyen número de frutos y número y peso de semillas, se determina para seleccionar parentales por su ACG para siguientes ciclos de recombinación. Con este tipo de estrategia se busca estimar heterosis para algunos caracteres, además de seleccionar parentales cuyas combinaciones genéticas permitan obtener poblaciones mejoradas. El estudio de parámetros genéticos como la heredabilidad de caracteres de interés también se realiza en el marco de esta estrategia de mejoramiento genético.

La estrategia de SR ha sido utilizada desde la década de los noventa en Brasil, Costa Rica, Ghana, India, Malasia, Papúa Nueva Guinea y Trinidad y Tobago (Bekele & Phillips-Mora, 2019). La recombinación genética a partir de polinizaciones dirigidas mediante cruzamientos entre dos parentales, o a partir de diseños de cruzamientos dialélicos, o diseños factoriales como Carolina Norte II, ha sido muy utilizada en mejoramiento genético de cacao para favorecer la resistencia a enfermedades y la productividad (Lopes et al., 2011). El uso de diseños factoriales permite estimar la ACG de cada parental para llevar a cabo nuevos cruzamientos entre los parentales con los mejores niveles de ACG; también ayuda a estimar la heredabilidad y el progreso genético alcanzado en cada ciclo de recombinación. La selección de individuos superiores en poblaciones segregantes, como las obtenidas de SR, contribuye al avance en el mejoramiento genético de cacao (Padi et al., 2016).

En otros países, ha sido adoptada una variante de esta estrategia: la selección recurrente recíproca (Eskes et al., 1995; Lopes et al., 2011; Pokou et al., 2009), la cual contempla el cruzamiento entre poblaciones diferentes y espera un efecto positivo de complementariedad de atributos favorables diferentes en cada población; además, busca favorecer la heterosis (Eskes et al., 1995). Sin embargo, la experiencia con selección recurrente recíproca en Ghana evidenció que esta estrategia no resultaba en un verdadero incremento en el vigor híbrido, y permitió concluir que la simple estrategia de SR es óptima como estrategia de mejoramiento genético en cacao (Pang & Lockwood, 2008).

La estrategia que se emplea en la actualidad contempla también la identificación y validación de marcadores moleculares asociados a atributos agronómicos de interés que puedan ser utilizados en la selección de árboles élite. Es así como AGROSAVIA identificó recientemente marcadores moleculares potencialmente relacionados con productividad y resistencia a monilia y escoba de bruja (Osorio-Guarín et al., 2020).

A partir de los ensayos de progenies en campo se seleccionan árboles que acumulan alelos favorables de resistencia a una o más limitantes fitosanitarias; estos árboles se usan como parentales en un siguiente ciclo de recombinación genética. Árboles productivos, de vigor moderado y resistentes a por lo menos una limitante fitosanitaria son seleccionados con dos propósitos: por un lado, se utilizan como parentales en un siguiente ciclo de recombinación, y, por otro lado, son propagados vegetativamente con el objetivo de evaluarlos en ensayos clonales multilocales, bajo diferentes condiciones edafoclimáticas, lo que permite obtener información de su interacción con el ambiente.

Interacción genotipo × ambiente

La interacción genotipo por ambiente es el desempeño diferencial de los genotipos en ambientes diversos, y es uno de los efectos de la función productiva o de fenotipo (Simmonds, 1981):

$$F = G + A + (G \times A)$$

Esta relación hace referencia al efecto que tiene sobre el fenotipo de cada individuo el genotipo (G) (información genética), el ambiente (A) (clima, suelo,

manejo por parte del productor) y la interacción entre estos ($G \times A$) (el comportamiento de los genotipos en los diferentes ambientes) (Simmonds, 1981).

Algunos estudios han reportado una interacción entre el genotipo, el ambiente y el manejo agronómico de plantaciones de cacao (Marfu et al., 2009). Estos estudios resaltan la importancia de determinar la estabilidad de genotipos promisorios en diferentes ambientes, teniendo en cuenta que la estabilidad en la expresión de atributos agronómicos de interés y de importancia económica puede no ser uniforme; por lo tanto, se deben realizar estudios de adaptabilidad a diferentes regiones antes de liberar nuevos genotipos en regiones distintas de aquellas donde han sido seleccionados.

Colombia es un país con una amplia diversidad en condiciones edafoclimáticas, por lo cual no es aconsejable dar recomendaciones respecto a un material genético con base en datos obtenidos en una sola localidad, y menos aún para un solo año de evaluación. En el país, es indispensable evaluar el desempeño agronómico de un material en un conjunto de ambientes y durante un periodo de años, y así aportar información de las interacciones genotipo $\times$ año y genotipo $\times$ localidad. A pesar de la importancia del efecto de la interacción genotipo $\times$ ambiente, en Colombia estos estudios apenas comienzan a recibir reconocimiento de su valor.

En línea con lo anterior, y considerando la gran variabilidad edafoclimática que existe en las regiones cacaoteras de Colombia, es necesario el establecimiento de pruebas multilocales que permitan estudiar el potencial de parentales promisorios o de clones en un amplio rango de ambientes para identificar el efecto de estos, además de la interacción genotipo $\times$ ambiente sobre el material en evaluación. Las pruebas multilocales permiten estimar el desempeño productivo, sanitario y de calidad de acuerdo con las características ambientales de cada localidad, con el objetivo de determinar la adaptabilidad general o específica de los genotipos, con lo cual es posible establecer dominios de recomendación.

Con la Resolución 067516 de 2020, el ICA estableció la normativa para la inscripción de nuevos cultivares, en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales, mediante el establecimiento de pruebas de evaluación agronómica (PEA). A partir de estas pruebas, se evaluaron genotipos promisorios en diferentes localidades en una misma subregión natural, con el objetivo de determinar

su grado de adaptación y de desempeño agronómico. En aras de obtener la ampliación de registro del cultivar para otras subregiones naturales, es necesario el establecimiento de nuevas PEA que permitan evaluar el desempeño de los cultivares en condiciones ambientales diferentes.

En el programa de mejoramiento genético propuesto en este documento, desde la estrategia central de SR, se espera obtener familias y genotipos mejorados con un grado de mayor estabilidad, bajo la premisa de rendimiento-estabilidad o resistencia-estabilidad, lo que además significa ofrecer materiales con mayor adaptabilidad a los cambios y ambientes (Fehr, 1991; Kang & Magari, 1996). De esta manera, se buscan genotipos que sean resilientes (o menos afectados) a las variaciones ambientales y cuyos atributos se maximicen por el efecto genético. El programa busca identificar tanto genotipos que se adapten bien a diferentes ambientes, como genotipos promisorios para ambientes específicos.

Uso de técnicas de secuenciación de alto rendimiento

El mejoramiento genético convencional de una especie perenne como el cacao implica tiempos de evaluación y selección muy largos, por lo cual el uso de nuevas tecnologías en programas de mejoramiento genético, como las contempladas por las ciencias ómicas (genómica, transcriptómica, proteómica, metabolómica y fenómica), es importante para la evaluación de familias mejoradas, pues así se incrementa la precisión de selección y se acelera la tasa de ganancia genética (Langridge & Fleury, 2011). Las técnicas de secuenciación de alto rendimiento generan una gran cantidad de datos que pueden ser utilizados en los procesos de selección temprana de individuos con rasgos de interés agronómico. Estos datos ayudan a identificar marcadores moleculares asociados a los fenotipos de interés de la especie de estudio (Kilian & Graner, 2012) y a investigar los mecanismos genéticos subyacentes de estos rasgos. Adicionalmente, estas tecnologías permiten una genotipificación profunda de las colecciones conservadas en bancos de germoplasma, y así se puede contribuir a dilucidar la identidad genética de las accesiones conservadas, al seguimiento de variedades y a la identificación de duplicados (McCouch et al., 2012).

La información genómica que se ha venido generando en el Programa de Mejoramiento Genético de Cacao permitirá en un futuro utilizar herramientas de selección genómica. Esta última utiliza marcadores genéticos

para predecir, a través de modelos, el valor genético de la población evaluada y de su progenie. La selección genómica puede utilizarse para acelerar la eficacia de los programas de mejoramiento genético en plantas y en animales (Budhlakoti et al., 2022; Fugerey-Scarbel et al., 2021, McGaugh et al., 2021) y, además, ayudar a predecir con precisión rasgos poligénicos complejos, como la resistencia a enfermedades, que en el caso del cultivo de cacao es una problemática mayor. El uso de herramientas de selección genómica ayudará a reducir el costo del programa de mejoramiento genético (Matthews et al., 2019), en este caso de cacao, dado que contribuye a disminuir la duración de cada ciclo de mejoramiento al apoyar las actividades de fenotipificación con genotipificación, lo que ayuda a mejorar la precisión en la selección (Fugerey-Scarbel et al., 2021). Este tipo de herramientas ha sido poco utilizado en el cultivo de cacao (Romero et al., 2017), pero se ha visto que tiene un gran potencial para el mejoramiento de la especie.

De manera complementaria, se busca el desarrollo y la implementación de herramientas de edición genómica utilizando la información generada en el Programa de Mejoramiento Genético de Cacao. Con estas herramientas se podrá modificar el genoma de una manera rápida, precisa y predecible; además, permitirán el desarrollo de nuevas variedades de cacao que sean menos susceptibles a enfermedades, y tener un cultivo más resiliente y sostenible en respuesta al cambio climático. Para esta tecnología, se usa la variación natural de cacao, evitando entrar en conflicto con la regulación de los organismos genéticamente modificados (Kuiken & Kuzma 2021). Es una tecnología que ya ha sido utilizada para silenciar genes supresores de la respuesta de defensa de la planta y que ha mostrado un incremento en la resistencia a *Phytophthora tropicalis* del tejido editado (Fister et al., 2018).



Estado actual del Programa de Mejoramiento Genético de cacao de AGROSAVIA

Obtención de progenies y selección combinada “árbol/progenie”

En 2019, se obtuvieron 87 progenies de hermanos completos a partir de polinizaciones dirigidas, empleando un diseño factorial que involucraba 42 parentales, de los cuales 21 fueron previamente identificados por su alta productividad (Perea et al., 2013) y 7 por resistencia a monilia (Osorio-Guarín et al., 2020; Jaimes et al., 2011); 7 fueron resistentes a mazorca negra (Nyassé et al., 2007), 5 a la escoba de bruja (Osorio-Guarín et al., 2020) y 2 al mal de machete (Vieira Midlej Silva et al., 2013). Estas progenies fueron establecidas bajo condiciones de vivero en cuatro centros de investigación de AGROSAVIA, donde se evaluaron por su resistencia a *Phytophthora palmivora* a partir de inoculaciones artificiales del patógeno; 17 progenies fueron evaluadas en el Centro de Investigación Palmira, Valle del Cauca, y 30 progenies en el Centro de Investigación El Mira, Nariño. Además, en el Centro de Investigación La Suiza, Santander, se evaluaron bajo condiciones de vivero 15 progenies por resistencia a *Ceratocystis* y 6 progenies por resistencia a escoba de bruja.

De las 87 progenies, 37 se sembraron en lotes experimentales en 2020 en los centros de investigación Palmira (11 progenies), El Mira (18 progenies) y El Nus, Antioquia (8 progenies). En 2022 se establecieron en campo 21 progenies en el Centro de Investigación La Suiza. En cada lote experimental, los árboles se evalúan por vigor, componentes de productividad y por su resistencia a las limitantes fitosanitarias que predominan en cada localidad.

Las progenies serán evaluadas en campo durante al menos ocho años, con el objetivo de seleccionar los mejores árboles dentro de las mejores progenies

para mitigar el efecto potencial de la posición del árbol en el lote. Algunos de los árboles seleccionados serán utilizados como parentales del siguiente ciclo de recombinación, mientras que otros serán evaluados en ensayos clonales, multilocales, para la selección de nuevos clones comerciales.

Los marcadores moleculares asociados a resistencia a monilia y a escoba de bruja, identificados por AGROSAVIA (Osorio-Guarín et al., 2020), serán validados y utilizados para apoyar la selección de progenies resistentes a estas limitantes fitosanitarias.

La larga duración de cada ciclo de selección, el requerimiento de grandes extensiones de superficie para la evaluación de progenies y de ensayos clonales, y los costos para su mantenimiento han afectado el avance y la continuidad de los programas de mejoramiento genético de cacao en el país, por lo que es importante el desarrollo de un programa nacional de mejoramiento genético, a partir de un esquema colaborativo entre instituciones que favorezca la evaluación de un mayor número de parentales, progenies y ensayos clonales multilocales.

Siguientes ciclos de SR

Los árboles seleccionados en los ciclos anteriores se usan como parentales para la creación de nuevas progenies. Se espera que, en cada ciclo de SR, se obtengan árboles que acumulen más alelos favorables. Además de los árboles seleccionados durante el ciclo anterior de SR, también se usarán como parentales árboles identificados como promisorios en el banco de germoplasma y en ensayos clonales que están actualmente en evaluación, establecidos con genotipos sobresalientes identificados en predios de productor en la década de los noventa. El objetivo de esto es introducir de forma constante diversidad genética al programa. Algunos atributos como tolerancia a estrés abiótico, baja asimilación de cadmio y calidad también son considerados en el programa. Asimismo, se contempla el uso de herramientas de selección temprana con el propósito de mejorar la precisión de selección y evaluar un mayor número de plantas bajo condiciones controladas. Lo anterior permite aplicar una presión de selección más alta y establecer en campo plantas identificadas como promisorias. El uso de estas herramientas variará en función del atributo de interés que se esté estudiando.

En Colombia, la técnica más común de propagación de cacao es la injertación; con esta se combinan atributos agronómicos de interés y de importancia económica entre copas y portainjertos. En algunas especies, los portainjertos son escogidos no solo por las características propias de su sistema radicular, sino también por las características que puedan transmitir a la copa (Warschefsky et al., 2016). Dentro de los materiales más utilizados como portainjertos en Colombia se encuentran IMC 67, PA 121, PA 46, P 7 y PA 50, seleccionados por su resistencia a *Phytophthora* sp., *Ceratocystis* sp. y adaptación a suelos ácidos (Palencia C. et al., 2007). Sin embargo, estos materiales no cuentan con información relacionada con su efecto sobre el desarrollo de copas de interés. Los efectos de la injertación pueden variar ampliamente en función de la característica que se encuentre en estudio y es fundamental escoger, de manera apropiada, la combinación copa × portainjerto, con el fin de obtener la respuesta esperada como disminución de la incidencia de enfermedades del suelo, eficiencia en la toma de nutrientes, incremento en la producción, menor absorción de cadmio, entre otras. Algunos de los atributos estudiados en portainjertos de cacao son vigor (Pang, 2004) y resistencia a patógenos como *Moniliophthora perniciosa* (Ribeiro et al., 2016); sin embargo, aún no se cuenta con información para la mayoría de los atributos de interés referentes al efecto del portainjerto en el desarrollo de la copa frente a factores de estrés biótico y abiótico.

A partir de 2019, AGROSAVIA empezó un programa de investigación en portainjertos de cacao, cuyo primer objetivo ha sido identificar los atributos agronómicos para los cuales el portainjerto tiene un efecto sobre el desarrollo de la copa. Familias de hermanos completos son obtenidas a partir de cruzamientos dirigidos entre árboles parentales promisorios y las progenies son evaluadas bajo factores de estrés biótico o abiótico. Los resultados de la primera fase de investigación contribuirán a definir la estrategia que se va a adoptar para cada atributo en un programa de mejoramiento genético, como se describe a continuación:

1. Cuando no hay efecto del portainjerto sobre la copa, el programa se enfocará en la selección de copas.

2. Cuando la influencia del portainjerto sobre la copa sea importante, el atributo será considerado en el programa de mejoramiento genético de portainjertos.
3. Cuando la influencia del portainjerto y la interacción copa $\times$ portainjerto sean importantes, el atributo será considerado y la selección de los portainjertos será implementada utilizando combinaciones con clones de interés como copa.
4. Una vez identificados los atributos para los cuales el portainjerto ejerce un efecto y la interacción copa $\times$ portainjerto sea importante, se combinarán atributos de interés en el portainjerto a partir de un programa de mejoramiento genético.

Los primeros atributos de interés contemplados en el programa de investigación en portainjertos de AGROSAVIA son acumulación de cadmio (Fernández-Paz et al., 2021), tolerancia al déficit hídrico, tolerancia a saturación de aluminio y resistencia a limitantes fitosanitarias como *Phytophthora palmivora*.

Teniendo en cuenta la amplia diversidad edafoclimática del país, los diferentes factores de estrés biótico y abiótico, así como la complejidad de los ensayos multilocales, se propone aunar esfuerzos entre instituciones para el establecimiento, la evaluación y la selección de clones, portainjertos y combinaciones copa $\times$ portainjerto en diferentes localidades. El trabajo colaborativo entre instituciones permitirá la generación de planes de manejo agronómico de las variedades seleccionadas. El nivel de auto e intercompatibilidad también será evaluado para identificar los clones que necesitan ser cultivados en mezcla en un mismo lote. En este caso, se recomendarán diseños de siembra de clones intercompatibles, con niveles de vigor similares (para evitar competencia) y desarrollo similar.

Estrategia Nacional de Mejoramiento Genético de Cacao: una propuesta para aunar esfuerzos en beneficio del productor de cacao colombiano

Con el objetivo de poner en marcha un programa nacional de mejoramiento genético de cacao, y siguiendo la estrategia de recombinación genética descrita en el documento, se propone comenzar por la creación de un comité nacional de mejoramiento genético de cacao, en el cual participen representantes de las diferentes instituciones del país que tienen en marcha actividades de mejoramiento genético de la especie. Dentro de las responsabilidades del comité deben contemplarse la revisión de los objetivos del programa de mejoramiento genético, además de la estrategia de SR que se propone para alcanzarlos. En aras de unificar la información con la que se cuenta, el comité nacional de mejoramiento genético de cacao deberá seleccionar una plataforma en la cual se registre la información obtenida de la evaluación de materiales genéticos, en diferentes regiones del país, alcanzada por las diferentes instituciones que participan en el comité.

De esta manera, la información registrada en la plataforma será analizada para una primera identificación de parentales con atributos agronómicos de interés y de importancia económica, además de un primer análisis de la interacción con el ambiente. Todas las instituciones que hagan parte del comité tendrán acceso a la información de los parentales, progenies, ciclos de recombinación y parámetros genéticos, con el propósito de apoyar el programa nacional de mejoramiento genético de cacao. Como resultado de los primeros análisis, se definirán diseños de cruzamientos, según los objetivos establecidos y las limitantes principales para las diferentes zonas productoras del país. Esto con el fin de apoyar los ciclos de recombinación genética contemplados en la estrategia de SR.



Agradecimientos

La estrategia de selección recurrente del actual Programa de Mejoramiento Genético de Cacao (n.º 1001035) se desarrolla con presupuesto de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), la cual es financiada con recursos públicos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). Algunas actividades del programa han recibido financiación de fuentes externas, como la que aportó la iniciativa "Cacao para la paz" implementada por USDA-FAS con financiación de USAID. Los autores expresan su agradecimiento a la Corporación, así como a todo su equipo de investigación en mejoramiento genético de cacao presente en los diferentes centros de investigación a nivel nacional que contribuyen al desarrollo del programa. Un especial agradecimiento a todas las otras instituciones nacionales cuyos equipos de investigación en cacao han aportado avances técnicos al sistema productivo.



Referencias

- Abbott, P. C., Benjamin, T. J., Burniske, G. R., Croft, M. M., Fenton, M., Kelly, C. R., Lundy, M., Rodríguez Camayo, F., & Wilcox, M. D. (2018). *An analysis of the supply chain of cacao in Colombia*. United States Agency for International Development (USAID).
- Agudelo Castañeda, G. A., Palencia Calderón, G. E., Antolínez Sandoval, E. Y., & Báez Daza, E. Y. (2017). *Nuevas variedades de cacao TCS (Theobroma Corpoica La Suiza) 13 y 19*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/11536>
- Aguirre-Forero, S. E., Piraneque-Gambasica, N. V., & Vásquez-Polo, J. R. (2020). Heavy metals content in soils and cocoa tissues in Magdalena department Colombia: emphasis in cadmium. *Entramado*, 16(2), 298-310. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.6753>
- Alarcón Restrepo, J., Arévalo Peñaranda, E., Díaz Jiménez, A., Galindo Álvarez, J., & Rosero, A. A. (2012). *Manejo fitosanitario del cultivo del cacao (Theobroma cacao L.). Medidas para la temporada invernal*. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA); Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR).
- Alban, K. A., Apshara, S. E., Hebbar, K. B., Mathias, T. G., & Séverin, A. (2016). Morpho-physiological criteria for assessment of two month old cocoa (*Theobroma cacao* L.) genotypes for drought tolerance. *Indian Journal of Plant Physiology*, 21(1), 23-30. <https://doi.org/10.1007/s40502-015-0195-y>
- Amortegui Novoa, G. M., & Becerra Betancourt, J. A. (2019). *Diagnóstico Sanitario del Jardín Clonal de Cacao (Theobroma Cacao), ubicado en la Granja Barcelona de la Universidad de los Llanos* [Tesis de pregrado, Universidad de los Llanos]. <https://repositorio.unillanos.edu.co/handle/001/1364>
- Aranzazu Hernández, F., & Jaimes Suárez, Y. (2010). *Manejo de las enfermedades del cacao (Theobroma cacao L.) en Colombia, con énfasis en monilia (Moniliophthora roreri)*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/12699>
- Aranzazu Hernández, F., Martínez Guerrero, N., & Rincón-Guarín, D. A. (2008). *Autocompatibilidad e intercompatibilidad sexual de materiales de ca-*

cao. Modelos para el empleo de los materiales de cacao más usados en Colombia utilizando los mejores porcentajes de intercompatibilidad. Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao); Corporación colombiana de investigación agropecuaria (AGROSAVIA); Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR); Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA); Sociedad de Agricultores de Colombia (SAC).

- Arguello Castellanos, C., Mejía Flórez, L. A., Contreras, N., & Toloza, J. (1999). *Evaluación, introducción y multiplicación de árboles élités como estrategia de productividad para el nororiente colombiano*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/handle/11348/4144>
- Báez Daza, E. Y., Agudelo Castañeda, G. A., Núñez Gómez, K. S., Rodríguez Silva, L. G., Coronado Silva, R. A., & López Giraldo, L. J. (2022). *Caracterización agronómica, fisicoquímica, sensorial y de metabolitos con actividad funcional de cacaos especiales cultivados bajo sistemas agroforestales en el departamento de Santander*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.investigation.7405309>
- Bailey, B. A., & Meinhardt, L. W. (Eds.). (2016). *Cacao diseases: a history of old enemies and new encounters*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24789-2>
- Baker, R. E. D., Cope, F. W., Holliday, P. C., Bartley, B. G., & Taylor, D. J. (1953). *The Anglo-Colombian cacao collecting expedition*. <http://www.icgd.rdg.ac.uk/docs/BAK53A.pdf>
- Ballesteros-Possú, W., Valencia, J. C., & Navia-Estrada, J. F. (2022). Assessment of a cocoa-based agroforestry system in the southwest of Colombia. *Sustainability*, 14(15), 9447. <https://doi.org/10.3390/su14159447>
- Becerra, L. D., Quintanilla-Carvajal, M. X., Escobar, S., & Ruiz, R. Y. (2023). Correlation between color parameters and bioactive compound content during cocoa seed transformation under controlled process conditions. *Food Bioscience*, 53, 102526. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102526>
- Becerra, L. D., Ruíz, R. Y., Rodríguez Cortina, J., Quintanilla-Carvajal, M. X., Coy-Barrera, E., & Escobar Parra, S. (2021). Chemical Characterization of Quality-Related Compounds in Cocoa Matrices: An Overview of Analytical Methods Applied for Their Analysis. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 1-29. <https://doi.org/10.1080/10408347.2021.1971511>
- Becerra, L. D., Zuluaga, M., Mayorga, E. Y., Moreno, F. L., Ruiz, R. Y., & Escobar, S. (2022). Cocoa seed transformation under controlled process

- conditions: Modelling of the mass transfer of organic acids and reducing sugar formation analysis. *Food and Bioproducts Processing*, 136, 211-225. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2022.10.008>
- Bekele, F., & Phillips-Mora, W. (2019). Cacao (*Theobroma cacao* L.) breeding. En J. M. Al-Khayri, S. Mohan Jain, & D. V. Johnson (Eds.), *Advances in Plant Breeding Strategies: Industrial and Food Crops* (pp. 409-487). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23265-8_12
- Bravo, D., & Benavides-Erazo, J. (2020). The Use of a Two-Dimensional Electrical Resistivity Tomography (2D-ERT) as a Technique for Cadmium Determination in Cacao Crop Soils. *Applied Sciences*, 10(12), 4149. <https://doi.org/10.3390/app10124149>
- Bravo, D., León-Moreno, C., Martínez, C. A., Varón-Ramírez, V. M., Araujo-Carrillo, G. A., Vargas, R., Quiroga-Mateus, R., Zamora, A., & Gutiérrez Rodríguez, E. A. (2021b). The first national survey of cadmium in cacao farm soil in Colombia. *Agronomy*, 11(4), 761. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040761>
- Bravo, D., León-Moreno, C., Quiroga, R., Zamora, A., Gutiérrez, E., Moreno, E., Duarte, D., Aristizábal, A., Arroyave, C., Cardona, I., Olarte, H., Orozco, M. L., & Guerra-Sierra, B. (2021a). *Investigación y recomendaciones sobre cadmio en el cultivo de cacao en Colombia*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/36606>
- Bravo, D., Pardo-Díaz, S., Benavides-Erazo, J., Rengifo-Estrada, G., Braissant, O., & León-Moreno, C. (2018). Cadmium and cadmium-tolerant soil bacteria in cacao crops from northeastern Colombia. *Journal of Applied Microbiology*, 124(5), 1175-1194. <https://doi.org/10.1111/jam.13698>
- Bravo, D., Santander, M., Rodríguez, J., Escobar, S., Ramtahal, G., & Atkinson, R. (2022). 'From soil to chocolate bar': identifying critical steps in the journey of cadmium in a Colombian cacao plantation. *Food Additives & Contaminants*, 39(5), 949-963. <https://doi.org/10.1080/19440049.2022.2040747>
- Budhlakoti, N., Kushwaha, A. K., Rai, A., Chaturvedi, K. K., Kumar, A., Pradhan, A. K., Kumar, U., Kumar, R. R., Juliana, P., Mishra, D. C., & Kumar, S. (2022). Genomic selection: A tool for accelerating the efficiency of molecular breeding for development of climate-resilient crops. *Frontiers in Genetics*, 13, 832153. <https://doi.org/10.3389/fgen.2022.832153>
- Carabalí Muñoz, A., Senejoa Lizcano, C. E., & Montes Prado, M. (2018). *Reconocimiento, daño y opciones de manejo de Carmenta foraseminis Eichlin (Lepidoptera: Sesiidae), perforador del fruto y semilla de cacao Theobroma*

- cacao* L. (*Malvaceae*). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7402599>
- Cárdenas López, J., Mujica Jaimes, J., Gómez Quiroga, R., & Aranzazu Hernández, L. F. (1999). *Manejo de las llagas radicales (Rosellinia sp.)*. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA); Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).
- Cárdenas Pardo, N. J., Darghan, A., Sosa Rico, M. D., & Rodríguez, A. (2017). Análisis espacial de la incidencia de enfermedades en diferentes genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en El Yopal (Casanare), Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 22(2), 209-220. <https://doi.org/10.15446/abc.v22n2.61161>
- Cerón, I. X. S., García, M. C. M., Cubillos, A. V., & López, M. P. H. (2020). *Poscosecha del cacao*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/36668>.
- Charry, E., Castro-Llanos, F., & Castro-Núñez, A. (2019). *Colombian cacao forests and peace initiative = Estudio de la línea base de la cadena del cacao en Colombia*. International Center for Tropical Agriculture (CIAT).
- Compañía Nacional de Chocolates. (2021a). *Modelo productivo para el Cacao (Theobroma cacao L.): sistemas agroforestales sostenibles*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/36934>
- Compañía Nacional de Chocolates. (2021b). *Características clones de cacao CNCH 12 y CNCH 13*. <https://chocolates.com.co/wp-content/uploads/2021/03/PDF-CLONES-12-Y-13-copia.pdf>
- Compañía Nacional de Chocolates. (2019a). *La Moniliasis del cacao: daños, síntomas, epidemiología y manejo*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/35705>
- Compañía Nacional de Chocolates. (2019b). *Cosecha, beneficio y calidad del grano de cacao (Theobroma cacao L.)*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/35706>
- Contreras Pedraza, C. A. (2017). *Análisis de la cadena de valor del cacao en Colombia: generación de estrategias tecnológicas en operaciones de cosecha y poscosecha, organizativas, de capacidad instalada y de mercado* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/60801>
- Cope, F. W. (1958). Incompatibility in *Theobroma cacao*. *Nature*, 181, 279. <https://doi.org/10.1038/181279a0>
- Cope, F. W. (1962). The mechanism of pollen incompatibility in *Theobroma cacao* L. *Heredity*, 17, 157-182. <https://doi.org/10.1038/hdy.1962.14>
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA]. (2014). *Clon de cacao TCS 06: Theobroma Corpoica La Suiza 06*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/34651>

- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA]. (2019). *Clon de Cacao TCS 01: Theobroma Corpoica La Suiza 01*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/34650>
- Correa Álvarez, J., Castro Martínez, S., & Coy, J. (2014). Estado de la Moniliasis del cacao causada por *Moniliophthora roreri* en Colombia. *Acta Agronómica*, 63(4), 388-399. <https://doi.org/10.15446/acag.v63n4.42747>
- Cubillos, G. (2013). *Manual del perforador de la mazorca del cacao Carmenta foraseminis (Busck) Eichlin*. Compañía Nacional de Chocolates.
- Cubillos, G., Merizalde, G. J., & Correa, E. (2008). *Manual de beneficio del cacao 2008. Para: técnicos, profesionales del sector agropecuario y productores*. Secretaría de Agricultura de Antioquia; Compañía Nacional de Chocolates; Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB); Grupo Giem Universidad de Antioquia. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/13260>
- Dávila Tafur, K. (2019). *Control biológico del mazorquero del cacao (Carmenta foraseminis) utilizando dos cepas nativas de Beauveria bassiana, región San Martín* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Martín Tarapoto]. <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/3138>
- De la Cruz, J., & Soria V., S. (1973). Estudio de fluctuaciones de polinización del cacao por las mosquitas *Forcipomyia* spp. (Díptera, Ceratopogonidae), en Palmira, Valle, Colombia. *Acta Agronómica*, 23(3-4), 1-17. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/48451
- Deus, V. L., Bispo, E. S., Franca, A. S., & Gloria, M. B. A. (2020). Influence of cocoa clones on the quality and functional properties of chocolate - Nitrogenous compounds. *Lwt*, 134, 110202. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110202>
- Engbersen, N., Gramlich, A., López, M., Schwarz, G., Hattendorf, B., Gutiérrez, O., & Schulin, R. (2019). Cadmium accumulation and allocation in different cacao cultivars. *Science of The Total Environment*, 678, 660-670. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.001>
- Enríquez Fajardo, M. Y. (2020). *Formular estrategias que permitan mejorar las características físicas y organolépticas del cacao producido por las Asociación de Organizaciones Productoras de Cacao de Tumaco en el Departamento de Nariño* [Tesis de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/36310>
- Escobar, S., Santander, M., Useche, P., Contreras, C., & Rodríguez, J. (2020). Aligning strategic objectives with research and development activities in a soft commodity sector: a technological plan for Colombian cocoa producers. *Agriculture*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/agriculture10050141>

- Escobar, S., Santander, M., Zuluaga, M., Chacón, I., Rodríguez, J., & Vaillant, F. (2021). Fine cocoa beans production: Tracking aroma precursors through a comprehensive analysis of flavor attributes formation. *Food Chemistry*, 365, 130627. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130627>
- Eskes, A., Paulin, D., Clément, D., N'Goran, J. A. K., Sounigo, A., Lachenaud, P., Cilas, C., Berry, D., & Yagmpam, A. (1995). Selection methods applied and genetic knowledge generated in cocoa breeding in Côte d'Ivoire and Cameroon. En *Proceedings of the international workshop on cocoa breeding strategies* (pp. 41-56). University of Reading.
- European Commission. (2014). Commission Regulation (EC) No 488/2014 of 12 May 2014 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels of cadmium in foodstuffs. *Official Journal of the European Union*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/93320940-da77-11e3-8cd4-01aa75ed71a1>
- Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2013). *Guía ambiental para el cultivo del cacao* (2.º ed.). Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR).
- Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2019). *Características de materiales de cacao colombiano*.
- Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2021a). *FSV 1* [Plegable divulgativo].
- Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2021b). *FBO 1* [Plegable divulgativo].
- Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2021c). *FCHI 8* [Plegable divulgativo].
- Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2021d). *FGI 4* [Plegable divulgativo].
- Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2021e). *FMA 7* [Plegable divulgativo].
- Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2022, 11 de febrero). *La producción cacaotera nacional sigue creciendo: en 2021 logra un nuevo récord histórico*. <https://www.fedecacao.com.co/post/la-produccion-cacaotera-nacional-sigue-creciendo-en-2021-logra-un-nuevo-record-historico>
- Fehr, W. (1991). *Principles of Cultivar Development: Theory and Technique*. MacMillan Publishing Company. <https://dr.lib.iastate.edu/handle/20.500.12876/4343>
- Fernández-Paz, J., Cortés, A. J., Hernández-Varela, C. A., Mejía de Tafur, M. S., Rodríguez-Medina, C., & Baligar, V. C. (2021). Rootstock-mediated genetic variance in cadmium uptake by juvenile cacao (*Theobroma*

- cacao* L.) genotypes, and its effect on growth and physiology. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.777842>
- Fernández Lizarazo, J. C. L., & Rodríguez Villate, A. (2019). *De cacao, cadmio y micorrizas: un vínculo genético insospechado*. Universidad de La Salle.
- Figueira, A., Lambert, S., Carpenter, D., Pires, J. L., Cascardo, J. C. M., & Romanczyk, L. (1997). The similarity of cocoa flavour of fermented seeds from fingerprinted genotypes of *Theobroma cacao* L. from Brazil and Malaysia. *Tropical Agriculture*, 74(2), 132-139.
- Figueroa Potes, A. (1952). *Monalonion* sp. Plaga importante en el cacao del valle del Cauca - Colombia. *Acta Agronómica*, 2(4), 183-193. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/49142
- Fister, A. S., Landherr, L., Maximova, S. N., & Gultinan, M. J. (2018). Transient Expression of CRISPR/Cas9 Machinery Targeting TcNPR3 Enhances Defense Response in *Theobroma cacao*. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00268>
- Ford, C. S., & Wilkinson, M. J. (2012). Confocal observations of late-acting self-incompatibility in *Theobroma cacao* L. *Sexual Plant Reproduction*, 25, 169-183. <https://doi.org/10.1007/s00497-012-0188-1>
- Fugerey-Scarbel, A., Bastien, C., Dupont-Nivet, M., & Lemarié, S. (2021). Why and how to switch to genomic selection: lessons from plant and animal breeding experience. *Frontiers in Genetics*, 12, 1185. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.629737>
- García, C. (1997). *Cacao (Theobroma cacao L.)*. Universidad Nacional de Colombia.
- Gil, J. P., López-Zuleta, S., Quiroga-Mateus, R. Y., Benavides-Erazo, J., Chaali, N., & Bravo, D. (2022). Cadmium distribution in soils, soil litter and cacao beans: a case study from Colombia. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 2455-2476. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03299-x>
- GrisalesOrtega, S.P., & AfanadorKafur, L. (2007). Análisis de variabilidad genética en *Moniliophthora roreri* con AP-PCR y RAPD en Antioquia, Colombia. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 9(2), 15-32. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5773>
- Hull, F. H. (1945). Recurrent selection for specific combining ability in corn. *Journal of the American Society of Agronomy*, 37(2), 134-145. <https://doi.org/10.2134/agronj1945.00021962003700020006x>
- Jácome Molina, D. M. (2018). *Efecto de la inoculación de Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) sobre un sistema suelo-planta de cacao en suelos contaminados con cadmio en etapa de vivero* [Tesis de maestría,

Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62938>

- Jaimes, Y. Y., González, C., Rojas, J., Cornejo, O. E., Mideros, M. F., Restrepo, S., Cilas, C., & Furtado, E. L. (2016). Geographic differentiation and population genetic structure of *Moniliophthora roreri* in the principal cocoa production areas in Colombia. *Plant Disease*, 100(8), 1548-1558. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-15-1498-RE>
- Jaimes, Y., Aránzazu, F., Rodríguez, E., & Martínez, N. (2011). Behavior of introduced regional clones of *Theobroma cacao* toward the infection *Moniliophthora roreri* in three different regions of Colombia. *Agronomía Colombiana*, 29(2), 361-371.
- Jenkins, M. T. (1940). The segregation of genes affecting yield of grain in maize. *Journal of the American Society of Agronomy*, 32(1), 55-63. <https://doi.org/10.2134/agronj1940.00021962003200010008x>
- Kang, M. S., & Magari, R. (1996). New development in selecting for phenotypic stability in crop breeding. En M. S. Kang, & Jr. Gauch (Eds.), *Genotype by Environment Interaction* (pp. 1-14). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780367802226>
- Kilian, B., & Graner, A. (2012). NGS technologies for analyzing germplasm diversity in genebanks. *Briefings in Functional Genomics*, 11(1), 38-50. <https://doi.org/10.1093/bfpg/elr046>
- Knight, R., & Rogers, H. H. (1953). Sterility in *Theobroma cacao* L. *Nature*, 172, 164. <https://doi.org/10.1038/172164a0>
- Knight, R., & Rogers, H. (1955). Incompatibility in *Theobroma cacao*. *Heredity*, 9, 6-77. <https://doi.org/10.1038/hdy.1955.3>
- Kuiken, T., & Kuzma, J. (2021). *Genome Editing in Latin America: Regional Regulatory Overview*. Inter-American Development Bank. <http://dx.doi.org/10.18235/0003410>
- Langridge, P., & Fleury, D. (2011). Making the most of 'omics' for crop breeding. *Trends in Biotechnology*, 29(1), 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2010.09.006>
- Lewis, C., Lennon, A. M., Eudoxie, G., & Umaharan, P. (2018). Genetic variation in bioaccumulation and partitioning of cadmium in *Theobroma cacao* L. *Science of The Total Environment*, 640-641, 696-703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.365>
- López, M. E., Ramírez, O. A., Dubón, A., Ribeiro, T. H. C., Díaz, F. J., & Chalfun-Junior, A. (2021). Sexual compatibility in cacao clones drives arrangements in the field leading to high yield. *Scientia Horticulturae*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110276>

- Lopes, U. V., Monteiro, W. R., Pires, J. L., Clement, D., Yamada, M. M., & Peres Gramacho, K. (2011). Cacao breeding in Bahia, Brazil: strategies and results. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 11, 73-81. <https://doi.org/10.1590/S1984-70332011000500011>
- Maddela, N. R., Kakarla, D., García, L. C., Chakraborty, S., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2020). Cocoa-laden cadmium threatens human health and cacao economy: A critical view. *Science of the Total Environment*, 720, 137645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137645>
- Marfu, J., Efron, Y., & Epaina P. (2009). Selection of new cocoa varieties through multi-location on-farm testing in Papua New Guinea. En A. B. Eskes, Y. Efron, M. J. End, & F. Bekele (Eds.), *Proceedings of the international workshop on cocoa breeding for farmers' needs* (pp. 115-122). Ingenic; Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Catie).
- Matthews, D., Kearney, J. F., Cromie, A. R., Hely, F. S., & Amer, P. R. (2019). Genetic benefits of genomic selection breeding programmes considering foreign sire contributions. *Genetics Selection Evolution*, 51, 40. <https://doi.org/10.1186/s12711-019-0483-5>
- McCouch, S. R., McNally, K. L., Wang, W., & Sackville Hamilton, R. (2012). Genomics of gene banks: a case study in rice. *American Journal of Botany*, 99(2), 407-423. <https://doi.org/10.3732/ajb.1100385>
- McGaugh, S. E., Lorenz, A. J., & Flagel, L. E. (2021). The utility of genomic prediction models in evolutionary genetics. *Proceedings of the Royal Society B*, 288(1956), 20210693. <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.0693>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2021, 5 de noviembre). Colombia registró la mayor producción de cacao de la historia, en el último año cacaotero. <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Colombia-registr%C3%B3-la-mayor-producci%C3%B3n-de-cacao-de-la-historia,-en-el-%C3%BAltimo-a%C3%B1o-cacaotero.aspx>
- Morillo, Y., Morillo, A. C., Muñoz F., J. E., Ballesteros P., W., & González, A. (2014). Molecular characterization of 93 genotypes of cocoa (*Theobroma cacao* L.) with random amplified microsatellites RAMs. *Agronomía colombiana*, 32(3), 315-325. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v32n3.46879>
- Niño Bernal, I. D. (2015). *Cuantificación de cadmio en cacao proveniente del Occidente de Boyacá por la técnica analítica de voltamperometría* [Tesis de pregrado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. <http://repositorio.uptc.edu.co/jspui/handle/001/1425>
- Nyadanu, D., Akromah, R., Adomako, B., Kwoseh, C., Lowor, S. T., Dzahini-Obiatey, H., Akrofi, A. Y., Owsu Ansah, F., & Assuah, M. K. (2012).

- Morpho-physiological mechanisms of resistance to black pod disease in cacao (*Theobroma cacao* L.). *International Journal of Plant Breeding and Genetics*, 6(2), 54-68. <https://doi.org/10.3923/ijpbg.2012.54.68>
- Nyassé, S., Efombagn, M. I. B., Kébé, B. I., Tahi, M., Despréaux, D., & Cilas, C. (2007). Integrated management of Phytophthora diseases on cocoa (*Theobroma cacao* L.): Impact of plant breeding on pod rot incidence. *Crop Protection*, 26(1), 40-45. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.03.015>
- Ocampo, R. F., Cadavid, V. S., Salazar, C. H., Sáenz, B., Agudelo, M.A., Grisales A., & Caicedo, A. A. (1987). Aspectos genéticos relacionados con el mejoramiento y productividad del cacao. IV Reunión técnica sobre el cultivo de cacao. *El Cacaotero Colombiano*, 34, 19-22.
- Ocampo, R. F., & Correa, J. T. (1978). Evaluación de híbridos de cacao al “mal de machete”. *El Cacaotero Colombiano*, 4, 29-30.
- Oicatá López, M. (1986). *Caracterización de 62 clones nacionales de cacao existentes en el Banco de Germoplasma del CNI Palmira*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).
- Osorio Guarín, J. A. (2009). *Caracterización molecular del banco de germoplasma de cacao (Theobroma cacao, l) del Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI mediante marcadores moleculares tipo microsatélites mediante marcadores moleculares tipo microsatélites* [Tesis de grado, Pontificia Universidad Javeriana]. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/8583>
- Osorio-Guarín, J. A., Berdugo-Cely, J. A., Coronado-Silva, R. A., Báez, E., Jaimes, Y., & Yockteng, R. (2020). Genome-wide association study reveals novel candidate genes associated with productivity and disease resistance to *Moniliophthora* spp. in cacao (*Theobroma cacao* L.). *G3: Genes, Genomes, Genetics*, 10(5), 1713-1725. <https://doi.org/10.1534/g3.120.401153>
- Osorio-Guarín, J. A., Berdugo-Cely, J., Coronado, R. A., Zapata, Y. P., Quintero, C., Gallego-Sánchez, G., & Yockteng, R. (2017). Colombia a source of cacao genetic diversity as revealed by the population structure analysis of germplasm bank of *Theobroma cacao* L. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1994. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01994>
- Osorio-Solano, C., Orozco-Castaño, C. A., López-Gartner, G. A., & Rivera-Páez, F. A. (2012). Variabilidad genética de *Moniliophthora perniciosa* (Stahel) Aime y Phillips-Mora, comb. nov. (Agaricales - Marasmiaceae) en variedades de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Agronómica*, 61(2), 93-101. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28122012000200001&lng=es&tlng=.

- Padi, F. K., Ofori, A., & Arthur, A. (2016). Genetic variation and combining abilities for vigour and yield in a recurrent selection programme for cacao. *The Journal of Agricultural Science*, 155(3), 444-464. <https://doi.org/10.1017/S0021859616000459>
- Palacios-Bejarano, C. A., Afanador-Kafuri, L., & Pardo-García, J. M. (2021). Identificación de aislados de *Phytophthora* spp. obtenidos de cultivos de cacao en Antioquia, Colombia. *Acta Agronómica*, 70(1), 17-26. <https://doi.org/10.15446/acag.v70n1.70619>
- Palencia C., G. E., Coronado S., R., Bastidas P., S., & Mejía F., L. A. (2008). *Identificación, selección y multiplicación de árboles élite o de alto rendimiento de cacao (Theobroma cacao L.) con la participación de los agricultores*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/13262>
- Palencia C., G. E., Gómez S., R., & Mejía F., L. A. (2007). *Patrones para cacao*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/2222>
- Pang, J. T.-Y. (2004). Rootstock effects on cocoa in Sabah, Malaysia. *Experimental Agriculture*, 40(4), 445-452. <https://doi.org/10.1017/S0014479704002108>
- Pang, J. T. Y., & Lockwood, G. (2008). A re-interpretation of hybrid vigour in cocoa. *Experimental Agriculture*, 44(3), 329-338. <https://doi.org/10.1017/S0014479708006431>
- Perea, J. A., Martínez, G. N., Aranzazu Hernández, F., & Cadena Cano, T. (2013). *Características de calidad del cacao de Colombia. Catálogo de 26 cultivos*. Universidad Industrial de Santander.
- Pérez Moncada, U. A., Ramírez Gómez, M. M., Serralde Ordóñez, D. P., Peñaranda Rolón, A. M., Wilches Ortiz, W. A., Ramírez, L., & Rengifo Estrada, G. A. (2019). Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) como estrategia para reducir la absorción de cadmio en plantas de cacao (*Theobroma cacao*). *Terra Latinoamericana*, 37(2), 121-130. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.479>
- Pérez-Zúñiga, J. I., Rojas-Molina, J., & Zabala-Perilla, A. F. (2021). Plant spacing assessment in cocoa (*Theobroma cacao* L.) agroforestry systems in the Colombian Pacific region. *Agronomía Colombiana*, 39(3), 426-437. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v39n3.90131>
- Phillips-Mora, W., Arciniegas Leal, A., Mata Quirós, A. Q., & Motamayor Arias, J. C. (2013). *Catálogo de clones de cacao seleccionados por el CATIE para siembras comerciales*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Catie). <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/7280>
- Pokou, N. D., N'Goran, J. A. K., Lachenaud, Ph., Eskes, A. B., Motamayor, J. C., Schnell, R., Kolesnikova-Allen, M., Clément, D., & Sangaré, A. (2009).

- Recurrent selection of cocoa populations in Côte d'Ivoire: comparative genetic diversity between the first and second cycles. *Plant Breeding*, 128(5), 514-520. <https://doi.org/10.1111/J.1439-0523.2008.01582.X>
- Rangel-Mendoza, J. A., & Silva-Parra, A. (2020). Agroforestry systems of *Theobroma cacao* L. affects soil and leaf litter quality. *Colombia Forestal*, 23(2), 75-88. <https://doi.org/10.14483/2256201x.16123>
- Ramírez Gil, J. G. (2016). Pérdidas económicas asociadas a la pudrición de la mazorca del cacao causada por *Phytophthora* spp., y *Moniliophthora roreri* (Cif y Par) Evans et al., en la hacienda Theobroma, Colombia. *Revista de Protección Vegetal*, 31(1), 42-49.
- Ribeiro, M. A. Q., De Almeida, A. A. F., Alves, T. F. O., Gramacho, K. P., Pirovani, C. P., & Valle, R. R. (2016). Rootstock × scion interactions on *Theobroma cacao* resistance to witches' broom: photosynthetic, nutritional and antioxidant metabolism responses. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38, 73. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2095-9>
- Rodríguez, T., Bonatti, M., Löhr, K., Lana, M., Del Rio, M., & Sieber, S. (2022). Analyzing influencing factors to scale up agroforestry systems in Colombia: A comparative ex-ante assessment of cacao farming and cattle ranching in two regions. *Agroforestry Systems*, 96(2), 435-446. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00730-1>
- Rodríguez Albarracín, H. S. (2017). *Dinámica del cadmio en suelos con niveles altos del elemento, en zonas productoras de cacao de Nilo y Yacopí, Cundinamarca* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62944>
- Rodríguez Giraldo, Y., Rodríguez Sánchez, E., Torres, L. G., Montenegro, A. C., & Pichimata, M. A. (2022). Development of validation methods to determine cadmium in cocoa almond from the beans by ICP-MS and ICP-OES. *Talanta Open*, 5, 100078. <https://doi.org/10.1016/j.talo.2021.100078>
- Rodríguez-Medina, C., Caicedo Arana, A., Sounigo, O., Argout, X., Alvarado Alvarado, G., & Yockteng, R. (2019). Cacao breeding in Colombia, past, present and future. *Breeding Science*, 69(3), 373-382. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.19011>
- Rodríguez Polanco, E., & Vera Rodríguez, A. G. (2015). Identificación y manejo de la pudrición parda de la mazorca (*Phytophthora* sp.) en cacao. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).
- Rodríguez Polanco, E., Parra Alferes, E. B., Bermeo Fúquene, P. A., Segura Amaya, J. D., & Rodríguez Polanco, L. A. (2020). Manejo de la pudrición parda de la mazorca (*Phytophthora palmivora*) en cacao por

- aplicación conjunta de prácticas culturales y químicas. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 16(1), 79-94. <https://doi.org/10.18359/rfcb.4887>
- Rodríguez Suárez, L., Suárez Salazar, J. C., Casanoves, F., & Ngo Bieng, M. A. (2021). Cacao agroforestry systems improve soil fertility: Comparison of soil properties between forest, cacao agroforestry systems, and pasture in the Colombian Amazon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 314, 107349. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107349>
- Romero, J. A. N., Phillips-Mora, W., Arciniegas-Leal, A., Mata-Quirós, A., Haiminen, N., Mustiga, G., Livingstone, D., van Bakel, H., Kuhn, D. N., Parida, L., Kasarskis, A., & Motamayor, J. C. (2017). Application of genome wide association and genomic prediction for improvement of cacao productivity and resistance to black and frosty pod diseases. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1905. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01905>
- Ruiz Erazo, X. A. (2014). *Diversidad genética de cacao Theobroma cacao L. con marcadores moleculares microsatélites* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/75268>
- Sáenz, J. B. (2007). Principales avances y resultados de la campaña de Monilia en Colombia. *Innovación y Cambio Tecnológico*, 6(6), 16- 20.
- Sánchez, I., Zárate, L. Á., Gallego, G., & Tohme, J. (2007). Análisis de la diversidad genética de accesiones de *Theobroma Cacao* L. del banco de conservación a cargo de corpoica. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 8(2), 26-31. https://doi.org/10.21930/rcta.vol8_num2_art:91
- Sánchez Vargas, A. del P., Castellanos Domínguez, O. F., & Domínguez Martínez, K. P. (2008). Mejoramiento de la poscosecha del cacao a partir del roadmapping. *Ingeniería e Investigación*, 28(3), 150-158. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v28n3.15135>
- Sandoval, J. F. P. (2019). *Efecto de las comunidades locales de hongos formadores de micorrizas arbusculares y patrones de injertación en la fisiología de plántulas de cacao sometidas a estrés por cadmio y zinc* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77228>
- Santander, M., Vaillant, F., Sinuco, D., Rodríguez, J., & Escobar, S. (2021). Enhancement of fine flavour cocoa attributes under a controlled post-harvest process. *Food Research International*, 143, 110236. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110236>
- Santander Muñoz, M., Rodríguez Cortina, J., Vaillant, F. E., & Escobar Parra, S. (2019). 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/10.1080/10408398.2019.1581726>
- Simmonds, N. W. (1981). Genotype (G), Environment (E) and GE components of crop yields. *Experimental Agriculture*, 17(4), 355-362. <https://doi.org/10.1017/S0014479700011807>
- Soria, S. de J. (1971). La polinización del cacao por las mosquitas *Forcipomyia* spp. (Diptera, Ceratogoconidae) en Palmira, Colombia. *Acta Agronómica*, 21(2), 77-82. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/48533
- Suárez-Contreras, L. Y. (2016). Aislamiento e identificación de *Moniliophthora roreri* causante de la moniliasis en municipios del nororiente colombiano y ensayos preliminares para su control biológico. *Respuestas*, 11(1), 3-8. <https://doi.org/10.22463/0122820X.623>
- Thomas, E., Van Zonneveld, M., Loo, J., Hodgkin, T., Galluzzi, G., & Van Etten, J. (2012). Present spatial Diversity Patterns of *Theobroma cacao* L. in the Neotropics Reflect Genetic Differentiation in Pleistocene Refugia Followed by Human-Influenced Dispersal. *PLoS ONE*, 7(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047676>
- Tirado-Gallego, P. A., Lopera-Álvarez, A., & Ríos-Osorio, L. A. (2016). Estrategias de control de *Moniliophthora roreri* y *Moniliophthora perniciosa* en *Theobroma cacao* L.: revisión sistemática. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 17(3), 417-430. https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:517
- Toledo-Hernández, M., Tschardtke, T., Tjoa, A., Anshary, A., Cyio, B., & Wanger, T. C. (2020). Hand pollination, not pesticides or fertilizers, increases cocoa yields and farmer income. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 304, 107160. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107160>
- Tovar, G., & Ortiz, M. (1991). La escoba de bruja del cacao [*Crinipellis perniciosa* (Stahel) Singer] en la región del Piedemonte Llanero de Colombia: estudio de la fructificación del hongo. *Agronomía Colombiana*, 8(1), 139-151.
- Van Wyk, M., Wingfield, B. D., Marin, M., & Wingfield, M. J. (2010). New *Ceratocystis* species infecting coffee, cacao, citrus and native trees in Colombia. *Fungal Diversity*, 40(1), 103-117. <https://doi.org/10.1007/s13225-009-0005-9>
- Vásquez Castañeda, Y., Muñoz Gutiérrez, J., Muriel Ruiz, S. B., & Hernández-Baz, F. (2015). Ocurrencia de los barrenadores *Carmenta foraminis* Eichlin y *Carmenta theobromae* (Busck) (Lepidoptera: Sesiidae) en *Theobroma cacao* L., en el departamento de Antioquia-Colombia. *Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle*, 16(1), 34-39.

- Vieira Midlej Silva, S. D., Lopes, U. V., Oliveira Damaceno, V., & de Oliveira Rocha Júnior, A. W. (2013). Seleção de clones de cacauzeiros resistentes à murcha-de-ceratocystis em condições de campo. *Agrotrópica*, 25(3), 163-170. <https://doi.org/10.21757/0103-3816.2013v25n3p163-170>
- Warschefskey, E. J., Klein, L. L., Frank, M. H., Chitwood, D. H., Londo, J. P., Von Wettberg, E. J., & Miller, A. J. (2016). Rootstocks: diversity, domestication, and impacts on shoot phenotypes. *Trends in Plant Science*, 21(5), 418-437. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.11.008>

Terminó de diseñarse
agosto de 2023, Bogotá, D. C., Colombia

Colombia es uno de los países más biodiversos a nivel mundial, cuenta con una amplia diversidad de recursos genéticos de flora y fauna que hacen del país un lugar estratégico, con gran potencial para el desarrollo de programas de mejoramiento genético. En cacao, una especie perenne, el mejoramiento genético es un proceso a largo plazo, que requiere ciclos de evaluación y selección de más de una década; la continuidad de este trabajo por parte de las instituciones involucradas y la intermitencia de las fuentes de financiación, hacen imperante establecer una alianza a nivel nacional que incentive la suma coordinada de esfuerzos del sector público y privado, para garantizar el uso eficiente de los recursos genéticos con los que cuenta el país, reconociendo diferencias regionales que pueden resultar de condiciones socioeconómicas y edafoclimáticas distintas, reflejadas en las diferentes limitantes del sistema productivo en cada región. El objetivo de este libro es socializar el programa actual de mejoramiento genético de cacao propuesto por AGROSAVIA, extendiendo una invitación a otras instituciones nacionales que se encuentran en la actualidad desarrollando actividades de mejoramiento genético, a aunar esfuerzos para construir juntos un programa de mejoramiento genético nacional de cacao que beneficie al productor con materiales de siembra productivos, con resistencia a limitantes fitosanitarias y tolerancia a factores de estrés abiótico. Esta iniciativa responde a la actual política de integración nacional, la cual reconoce diferencias regionales que se capitalizan en la creación de estrategias de articulación, fortaleciendo componentes sociales, económicos y productivos en el país.



BIBLIOTECA AGROPECUARIA DE COLOMBIA

CORREO: **bac@agrosavia.co**

TELÉFONO: **(601) 422 73 00 EXT. 1257 o 1274**

SKYPE: **[biblioteca.agropecuaria](https://www.skype.com/name/identifiers/alias/biblioteca.agropecuaria)**

www.agrosavia.org.co

**Distribución gratuita
Prohibida su venta**