

Sonia Esperanza Aguirre Forero - Nelson Virgilio Piraneque Gambasica
Carlos Arturo Robles Algarín

ECOSISTEMA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA: REFLEXIONES DESDE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA



Ecosistema Sierra Nevada de Santa Marta: reflexiones desde la ciencia y la tecnología

**Sonia Esperanza Aguirre Forero
Nelson Virgilio Piraneque Gambasica
Carlos Arturo Robles Algarín**

Colección Santa Marta 500 años



Catalogación en la publicación – Biblioteca Nacional de Colombia

Aguirre Forero, Sonia Esperanza, autora

Ecosistema Sierra Nevada de Santa Marta : reflexiones desde la ciencia y la tecnología / Sonia Esperanza Aguirre Forero, Nelson Virgilio Piraneque Gambasica, Carlos Arturo Robles Algarín. -- Primera edición. -- Santa Marta : Editorial Unimagdalena, 2024.

1 recurso en línea : archivo de texto: PDF. -- (Colección 500 años de Santa Marta)

Incluye referencias bibliográficas al final de cada capítulo.

ISBN 978-958-746-689-8 (pdf) -- 978-958-746-690-4 (epub)

1. Ecosistemas - Investigaciones - Sierra Nevada de Santa Marta 2. Desarrollo sostenible - Sierra Nevada de Santa Marta 3. Sistemas híbridos de energía - Santa Marta 4. Plantas para tratamiento de agua - Santa Marta 5. Café - Cosecha - Magdalena 6. Ciencia y tecnología I. Piraneque Gambasica, Nelson Virgilio, autor II. Robles Algarín, Carlos Arturo, autor

CDD: 577.098611 ed. 23

CO-BoBN- a1135295

Primera edición, enero de 2024

2024 © Universidad del Magdalena. Derechos Reservados.

Editorial Unimagdalena

Carrera 32 n.o 22-08

Edificio de Innovación y Emprendimiento

(57 - 605) 4381000 Ext. 1888

Santa Marta D.T.C.H. - Colombia

editorial@unimagdalena.edu.co

<https://editorial.unimagdalena.edu.co/>

Colección Santa Marta 500 años

Rector: Pablo Vera Salazar

Vicerrector de Investigación: Jorge Enrique Elías-Caro

Diseño editorial: Luis Felipe Márquez Lora

Diagramación: Eduard Hernández Rodríguez

Diseño de portada: Lisa Paola Calderón Camargo

Corrección de estilo: Juan Diego Mican González

Santa Marta, Colombia, 2024

ISBN: 978-958-746-689-8 (pdf)

ISBN: 978-958-746-690-4 (epub)

DOI: <https://doi.org/10.21676/9789587466898>

La UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA, en su calidad de editora y titular de derechos patrimoniales de autor, y en su propósito de contribuir con la difusión y divulgación del conocimiento, la producción intelectual y la educación, dispone autorizar la reproducción impresa o digital del presente libro, de manera total o parcial, así como su distribución, difusión o comunicación pública (puesta a disposición) en medio impreso o digital de manera libre y gratuita, en tanto se mantenga la integridad del texto y se dé la correspondiente cita a sus autores y mención institucional. Queda prohibida la comercialización o venta a cualquier título de este material.



Las opiniones expresadas en esta obra son responsabilidad de los autores y no compromete al pensamiento institucional de la Universidad del Magdalena, ni genera responsabilidad frente a terceros.

[...] la Sierra Nevada de Santa Marta, mundo plurilingüe donde se habla desde tiempos inmemoriales cuatro lenguas de origen chibcha, más dos lenguas sagradas. Donde desde la llegada de los españoles se vienen dando procesos de colonización que han intentado, por una parte, la imposición del español y, por otra, la anulación de las lenguas indígenas. Proceso reforzado en el presente siglo mediante la institucionalización de la escuela y la prohibición de los sistemas educativos autóctonos y del uso de las lenguas vernáculas, en el marco de la colonización adelantada por el Estado (con misioneros a la cabeza) y por campesinos criollos venidos del interior del país.

María Trillos Amaya (1995): *Multilingüismo en la Sierra Nevada de Santa Marta*, p. 293.

Agradecimientos

Detrás de cada trabajo como el que hoy presentamos, existe un talento humano invaluable de jóvenes que han contribuido a su desarrollo, semillas sembradas desde la academia que se incorporan en los proyectos y son agentes activos en las comunidades. A ellos, nuestro respeto y agradecimiento. Conjuntamente, a los profesionales de la Vicerrectoría de Investigación y de la Editorial de la Universidad del Magdalena. Al Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación Francisco José de Caldas, contrato 193-219, por la financiación de este trabajo. Finalmente, queremos agradecer a los ingenieros electrónicos y ambientales que participaron en la intervención tecnológica realizada en la IED La Revuelta: Víctor Olivero, Julie Viloría, Diego Restrepo, Jordan Guillot, Andrea Cabrera y Elizabeth Fernández.

A todos ellos muchas gracias.

Los autores

Contenido

Introducción.....	10
Sierra Nevada de Santa Marta: ecosistema estratégico para la sostenibilidad ambiental y el bienestar humano	12
Sierra Nevada de Santa Marta.....	13
Caracterización biofísica de la SNSM.....	14
Población.....	16
Economía.....	17
Ecosistema estratégico.....	19
¿Quién gobierna la Sierra?	21
Ciencia, tecnología, desarrollo social y bioeconomía	21
Principales investigaciones en torno al ecosistema de la SNSM	25
Reflexión y análisis	29
Conclusiones.....	32
Referencias.....	33
Validación de la cosecha asistida de café en los municipios productores del departamento del Magdalena: tecnología clave del desarrollo sostenible	37
Preámbulo.....	37
Resumen.....	40
Abstract.....	41
Fundamentación.....	43
<i>Café en el mundo</i>	43
<i>Café en Colombia</i>	43
<i>Café en el departamento del Magdalena</i>	43
<i>Varietal de café Castillo</i>	43
Recolección de café	45
Estado del arte.....	48
Materiales y métodos.....	49
Área de trabajo	49

<i>Material vegetal</i>	51
<i>Retención de pases</i>	51
<i>Validación de lonas para la cosecha manual de café</i>	52
<i>Validación de la derribadora selectiva de café Brudden DSC-18</i>	56
Análisis.....	57
Resultados y discusión.....	59
<i>Masa cosechada</i>	59
<i>Porcentaje de frutos cosechados</i>	59
<i>Rendimiento</i>	60
<i>Pérdidas</i>	61
<i>Eficacia</i>	62
<i>Uso del Mediverde®</i>	63
<i>Consideraciones finales</i>	63
Conclusiones y recomendaciones.....	64
Agradecimientos.....	65
Referencias.....	67

Implementación de un sistema renovable híbrido solar-eólico y una planta de tratamiento de agua potable para los miembros de la comunidad académica de la Institución Educativa Distrital La Revuelta, Guachaca, Santa Marta	71
Preámbulo.....	72
Resumen	75
Abstract.....	76
Desarrollo del caso de estudio.....	77
<i>Selección de la institución educativa rural</i>	77
<i>Dimensionamiento del sistema híbrido renovable solar-eólico</i>	79
<i>Diagnóstico ambiental de la IED La Revuelta</i>	82
<i>Zona de estudio</i>	82
<i>Planta de tratamiento de agua</i>	83
<i>Capacitaciones</i>	84
Resultados de la intervención tecnológica	85
<i>Mapa de idoneidad para la instalación de sistemas híbridos</i>	85
<i>Implementación del sistema híbrido solar-eólico</i>	86
<i>Resultados del diagnóstico ambiental</i>	88
<i>Calidad del agua y planta de tratamiento</i>	89
<i>Resultados de las capacitaciones</i>	92
Conclusiones	94
Referencias.....	95
Los Autores	97

Lista de tablas

Tabla 1. Áreas del conocimiento con mayor número de publicaciones sobre la SNSM y revistas científicas con mayor publicación en el tema	26
Tabla 2. Escala del AHP para la comparación por pares.....	78
Tabla 3. Cuadro de cargas	79
Tabla 4. Datos del generador solar fotovoltaico	80
Tabla 5. Componentes del sistema híbrido	81
Tabla 6. Métodos utilizados para el análisis de las muestras de agua	84
Tabla 7. Resultados para los criterios	85
Tabla 8. Resultados y estrategias del análisis de los medios abiótico, biótico y socioeconómico.....	88
Tabla 9. Matriz DOFA del diagnóstico ambiental.....	89
Tabla 10. Resultados del análisis preliminar de la calidad del agua de la IED La Revuelta en cuatro sedes objeto de intervención tecnológica.....	90
Tabla 11. Resultados de la calidad del agua de la PTAP en la sede San Rafael	91

Lista de figuras

Figura 1. Localización de la SNSM.....	14
Figura 2. Representación de la SNSM como territorio sagrado.....	16
Figura 3. Reciprocidad del bienestar y servicios ecosistémicos.....	24
Figura 4. Distribución cronológica de estudios en la SNSM 2012-2022	27
Figura 5. Mapa de redes de coocurrencia de palabras clave de autor	27
Figura 6. Mapa de redes de coautorías: países (– denota cooperación internacional)	29
Figura 7. Datos relevantes del sector productivo cafetero en el departamento del Magdalena (SNSM)	44
Figura 8. Proceso de desarrollo del fruto de café cultivar Castillo en la SNSM.....	45
Figura 9. Ubicación de las fincas cafeteras en los municipios de Santa Marta, Ciénaga, Aracataca y Fundación donde se validó la tecnología de cosecha asistida	50
Figura 10. Diagrama de flujo de la cosecha de café con derribadora DSC-18.....	57
Figura 11. Promedio de la masa cosechada de café de acuerdo con el método de recolección en la SNSM.....	59
Figura 12. Promedio del porcentaje de frutos de café cosechados de acuerdo con el método de recolección en la SNSM.....	60
Figura 13. Rendimiento promedio obtenido con diferentes métodos de cosecha de café en la SNSM.....	61

Figura 14. Frutos dejados en el suelo en cada sitio donde se implementó la recolección de café con tres métodos en la SNSM.....	62
Figura 15. Número promedio de frutos maduros que quedaron en el árbol de café luego de la recolección por tres métodos en la SNSM	62
Figura 16. Hacia el futuro de las energías alternativas para las comunidades más vulnerables	72
Figura 17. Estructura jerárquica para el problema de decisión	78
Figura 18. Localización de la sede San Rafael.....	82
Figura 19. Mapa de idoneidad para la instalación de sistemas híbridos.....	86
Figura 20. Diagrama de bloques del sistema híbrido.....	87
Figura 21. Sistema híbrido implementado en la IED La Revuelta, sede San Rafael	87
Figura 22. Etapas de la PTAP en la IED La Revuelta.....	90
Figura 23. PTAP implementada en la IED La Revuelta, sede San Rafael (420 l/hora)	91
Figura 24. Resultados de la encuesta (preguntas 1-8).....	93

Lista de fotos

Foto 1. Método tradicional de recolección de café en la SNSM	46
Foto 2. Cosecha asistida de café empleando derribadora Brudden DSC-18 en la SNSM.	47
Foto 3. Plantas de café listas para el proceso de recolección en la SNSM.....	51
Foto 4. Producción del café. La retención de pases conlleva a tener mayor masa de fruto maduro en el árbol.....	52
Foto 5. Recolección manual de café con el método tradicional (coco)	53
Foto 6. Cosecha de café asistida con lonas en la SNSM.....	54
Foto 7. Selección del número de frutos verdes, pintones, maduros, sobremaduros y secos de la masa cosechada.....	55
Foto 8. Cosecha asistida de café con derribadora selectiva Brudden DSC-18	56
Foto 9. Frutos verdes de café con presencia de broca (<i>H. hampei</i>)	61
Foto 10. Uso de Mediverde® para determinar porcentaje de café recogido en diferentes estados de maduración en la SNSM.....	63
Foto 11. Capacitaciones a la comunidad académica de la sede San Rafael	92

Introducción

Reconocer la relevancia y la complejidad de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) determina el uso e indica la vocación del territorio y el contexto en el que se desarrollan sus comunidades. Este es uno de los primeros pasos para fomentar la conservación del ecosistema y crear conciencia pública y gobernanza de la importancia de la vida. Esta concepción requiere un entendimiento holístico para ahondar en una reflexión, resultado de la perspectiva interdisciplinar del ecosistema. Por esta razón se planteó socializar los resultados de dos proyectos de investigación: «Sistema de generación híbrido solar-eólico para brindar servicios de primera necesidad en instituciones educativas distritales de las zonas rurales» e «Innovación para el desarrollo tecnológico en la cosecha de café Innocafé», financiados por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) y la Universidad del Magdalena. Asimismo, describe la experiencia de pasantías de investigación de estudiantes en contextos rurales de la SNSM.

La investigación aplicada proporciona un adelanto tecnológico de cara al desarrollo socioeconómico en los territorios. No obstante, cabe tener presente que el empleo de la tecnología debe adaptarse al contexto con el fin de reducir los riesgos que conlleva un uso inadecuado, lo cual genera incertidumbre y retroceso en el bienestar de la comunidad. Por lo tanto, se concibe la tecnología como el instrumento de transformación, avance y sostén de las estructuras productivas, y también como de conservación o uso equilibrado de los recursos naturales esenciales para resolver problemas —entre ellos, el cambio climático—. En ese orden de ideas, se planteó la implementación de tecnología para promover el bienestar en la comunidad rural, incentivando la gestión de los recursos naturales, el uso de energías renovables y la seguridad alimentaria en comunidades rurales de la SNSM.

El texto se divide en dos partes. La primera analiza la importancia de la SNSM y el aporte a las comunidades, las características de su entorno y su relación con el ambiente. Así, a la vez que se reconoce la importancia del ecosistema, se da cuenta del conflicto social y de uso de su territorio presente, para finalizar con un recorrido por las principales contribuciones de la investigación en este entorno y una síntesis o reflexión del aporte de la tecnología para contribuir a cerrar brechas en las comunidades de la Sierra.

La segunda parte presenta dos estudios de caso puntuales donde se describe y evidencia la adaptación y aplicación de la tecnología en dos sectores de la SNSM. El primer estudio

hace referencia a la cosecha asistida de café con el fin de mejorar la eficiencia en la recolección, bajar la presión por plagas y, así, reducir costos de producción. El segundo estudio, por otro lado, pone de manifiesto el uso de la tecnología asistida por energías renovables en el proceso de tratamiento de agua en la Institución Educativa La Revuelta, sede San Rafael, ubicada en la zona rural del distrito de Santa Marta, con el fin de mejorar el acceso a la energía y entregar agua potable para todos los miembros de la comunidad académica.

El área de estudio seleccionada se centra en dos sectores de alta movilidad que corresponden a la cara noroeste (Guachaca, Minca) y la occidental (San Pedro de la Sierra) de la SNSM. Se trata de zonas impactadas por el hombre (deforestación, contaminación de corrientes hídricas, erosión de suelos por intervención agrícola y sobrepastoreo), lo que afecta los recursos naturales y la estabilidad del sistema. Frente a esta situación, se planteó el siguiente interrogante: ¿cómo el desarrollo tecnológico fomenta un mejor manejo del territorio y colabora en el bienestar de la comunidad? Esta es una pregunta cuya respuesta debe sustentarse desde la visión del sistema y debatirse, ya que se siguen privilegiando la intervención y la producción sobre la difusión de la importancia ecosistema y el uso y la integración social del conocimiento científico y tecnológico.

Sierra Nevada de Santa Marta: ecosistema estratégico para la sostenibilidad ambiental y el bienestar humano

La importancia estratégica de la SNSM no se registra por la calidad de sus suelos, ante sus limitaciones topográficas y deficiencias agrológicas, sino en lo ambiental: es una estrella de agua y biodiversidad que marca el desarrollo agropecuario y la seguridad alimentaria, que irradia y alcanza tierras de exportación agrícola de la zona Caribe. Conjuntamente, es un refugio natural económico y social invaluable, reconocido a nivel internacional. Proteger la Sierra es una obligación, y desde la academia existe una responsabilidad ética de divulgar el conocimiento holístico del ecosistema y su jerarquía en la preservación de la vida.

En esta medida, es esencial reconocer a los habitantes de la SNSM y sus actividades socioeconómicas de subsistencia (quema y tala, cultivos ilícitos, grupos al margen de la ley, ganadería y agricultura, entre otros), asentadas desde la época de la Conquista. Estas poblaciones han permeado el ecosistema con una filosofía de desarrollo diferente a la de las comunidades autóctonas, implementando un sistema socioeconómico de cambio del uso del suelo, conjugado con la producción agropecuaria para aprovechar los recursos naturales, por lo que se requiere una reconversión de muchas prácticas en su territorio. No se pretende establecer juicios, pero es claro manifestar la importancia del ecosistema (SNSM) y reorientar el sector socioeconómico en torno a la vocación del territorio, lo que consentirá prácticas más sostenibles y una mejor convivencia.

Una de las alternativas es fortalecer las capacidades tecnológicas para la resolución de conflictos, optimizar el uso de los recursos naturales y mejorar el bienestar de la población, entendiendo la tecnología como los conocimientos y herramientas que minimizan el impacto ambiental antrópico y que permiten un mejor vivir, independientemente de la visión de desarrollo. En este apartado se planteó la posibilidad de conocer las principales investigaciones que se han realizado en el entorno de la SNSM y evidenciar su complejidad, su valor natural y sociocultural y contribución a la identidad, las tradiciones y los valores éticos y espirituales, así como las relaciones intrínsecas establecidas en este territorio a través del tiempo. De este modo se logrará un punto de partida que permita identificar el estado actual de la Sierra e implementar estrategias tecnológicas sistémicas en las comunidades rurales que la habitan.

Dentro del equilibrio del ecosistema de la SNSM, un factor fundamental es la metafísica y la cosmovisión social del territorio para los indígenas. Por lo tanto, es necesario respetar y reconocer sus lugares sagrados como una red ecológica y social fundamental para la conservación de la vida, que evoca a la madre naturaleza, aun sin distinguir las relaciones entre lo abstracto y el conocimiento. Según Giraldo (2010), «en la cosmovisión arhuaca cada objeto, ser vivo o hecho, posee un origen —representado en los Padres Espirituales—» (p. 189). Sin embargo, incluso si se deja a un margen la espiritualidad, no deja de ser evidente la importancia del capital biofísico en la viabilidad del ecosistema, como por ejemplo la producción de fotosíntesis en el mantenimiento de la estructura de la biósfera y amortiguación de la variabilidad climática.

La situación actual del ecosistema invita a conocer y divulgar la importancia estratégica de la SNSM, no solo para poder concebir la cosmovisión ancestral, sino para buscar soluciones más pertinentes con su vocación como los programas de información tecnocientífica que orientan la toma de decisiones o los desarrollos tecnológicos sostenibles más coherentes con la vocación del territorio. Por tal motivo, se plantea un recorrido rápido de la evolución del conocimiento en torno a la Sierra y su reflexión.

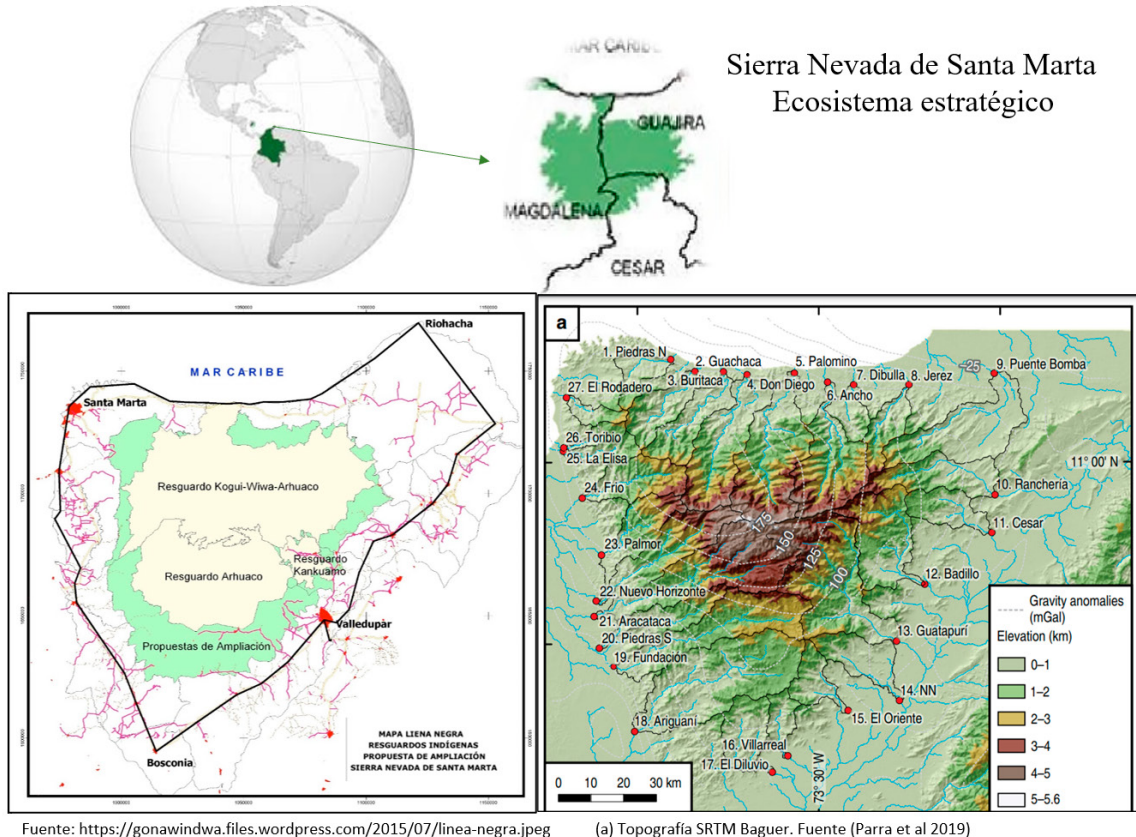
Sierra Nevada de Santa Marta

La SNMS es un sistema de relieve triangular localizado al nordeste de Colombia, independiente de la cordillera de los Andes, donde se elevan las montañas más altas del país (los picos Simón Bolívar y Cristóbal Colón, a 5.775 m s. n. m.). Esta formación geológica presenta diversidad de climas en un pequeño trayecto, desde cálido a nivel del mar hasta nieves perpetuas, una de las razones por las que fue declarada Reserva del Hombre y de la Biósfera por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco) (Figura 1).

En este ecosistema estratégico, compartido entre tres departamentos (Magdalena, La Guajira y Cesar), se configura una estrella hidrográfica de treinta ríos principales que abastecen más de 20 acueductos. Allí se congrega una enorme biodiversidad: ecosistemas de bosque seco tropical (amenazados a nivel global), sistemas humedales, manglares, xerofíticos y subxerofíticos, playas, praderas de pastos marinos y arrecifes de coral.

En la SNSM se han declarado áreas protegidas (Decreto 1500 de 2018): la Zona de Reserva Forestal (Ley 2.ª de 1959), la Reserva de la Biósfera y Patrimonio de la Humanidad por la Unesco (1979), y la Zona de Protección y Desarrollo de los Recursos Naturales Renovables y del Medio Ambiente (Resolución 0504 del 2 de abril de 2018, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Minambiente]). Asimismo, ha sido catalogada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) como una de las zonas irremplazables en el mundo porque contiene un sinnúmero de especies que están amenazadas globalmente. Así pues, «el mantenimiento de sus funciones biológicas a través de la ampliación del área protegida contribuirá positivamente como estrategia de reducción de pérdida de biodiversidad a nivel mundial» (Minambiente, 2018, p. 1).

Figura 1. Localización de la SNSM



Fuente: adaptado de Parra *et al.* (2019) y gonawindwa.files.wordpress.com.

Caracterización biofísica de la SNSM

La SNSM es un macizo orográfico localizado al norte de Colombia, entre la desembocadura del río Magdalena y la serranía del Perijá. Se localiza en la región Caribe, a $10^{\circ}10'$ y $11^{\circ}20' N$ y $72^{\circ}30' W$ y $74^{\circ}15' W$, con una altura máxima de 5.776 m. Comprende un área aproximada de 12.000 km² (Fundación ProSierra Nevada de Santa Marta [ProSierra], 1991), y en pocos kilómetros se encuentran todos los pisos térmicos, lo que genera alta diversidad del ecosistema (Rangel y Garzón, 1995).

Desde el punto de vista geológico, la SNSM es una de las áreas del país más complejas. Consiste en un sistema montañoso que se levanta varios kilómetros, desarrollado entre el Mioceno inferior y el Pleistoceno superior, con afloramientos rocosos de diferentes tipos: batolitos graníticos, dioríticos y cuarzos monzoníticos del Mesozoico y del Terciario con rocas de origen volcánico (riolitas e ignimbritas) y sedimentario (calizas, arenisca y limolitas) de génesis marino y continental (Bartels, 1984; Carrizosa, 1989, citado por Rangel y Garzón, 1995).

El clima de la SNSM se caracteriza por ser tropical y montañoso. Sin embargo, debido a la altitud, la topografía y los vientos alisios, se observa alta variabilidad, desde cálido árido, cálido seco y cálido húmedo hasta templado muy húmedo, frío muy húmedo y cálido húmedo. La precipitación (550 mm en las zonas secas y hasta 2.519 mm en las zonas más húmedas) es de régimen bimodal, con dos periodos secos (enero-abril y julio-agosto) y dos épocas lluviosas (septiembre-noviembre y mayo-junio) (Serna *et al.*, 2015).

En la Sierra se presentan diferentes tipos de suelo (Sevink, 1984; Van der Hammen, 1984). Entre 500-1.300 m de altura, los suelos se clasifican como Dystropepts, con pH que van desde extremadamente ácidos hasta alcalinos y temperatura media anual de 19,5 °C, con precipitación entre 1.500-2.000 mm. En el rango de 1.300-1.500 m se encuentran los Humitropepts, con valores de pH extremadamente ácidos, temperatura media anual de 14,5 °C y precipitación de 3.500 mm. A alturas de 2.500-3.300 m los suelos son Tropaquepts, con valores de pH extremadamente ácidos, temperatura media anual de 9 °C y precipitación de 2.200 mm. Entre los 3.300-4.100 m se observan Cryaquepts y Placaquepts, con pH desde ácido hasta moderadamente neutro, temperatura media anual de 7 °C y precipitación de 1.300 mm. Por último, en la zona alta (3.300-5.000 m) se ubican varias lagunas que son nacimientos de los ríos Sevilla, Frío, Tucurinca y Buritaca, que suministran agua para las poblaciones de Santa Marta, Zona Bananera y Fundación.

Del ecosistema SNSM, solo el 15 % se considera como bosque no alterado o escasamente intervenido (diferente a bosque primario), mientras que en el 85 % restante prevalecen las actividades antrópicas que originan degradación del territorio (Viloria, 2005).

En el año 1990, el Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Medio Ambiente (Inderena) promovió la creación de dos parques nacionales:

- Parque Nacional Natural Tayrona: Localizado entre 11°18' N y 11°21' N y 74,4° W y 74,7° W, en el departamento del Magdalena, con extensión de 150 km² y altitudes que oscilan entre 0-950 m. Los accidentes geográficos más importantes son los cerros de Palmarito, San Lucas, Taganga, El Cielo y Aguas Muertas. Las laderas del parque finalizan en el mar, en donde se encuentran las ensenadas de Cinto, Guachaquinta, Palmarito, Concha, Chenge, Gayraca y Neguange. Los suelos del parque son diversos, de estructura simple, desarrollados sobre materiales aluviales o coluviales (Cortés, 1975).
- Parque Nacional Natural Sierra Nevada de Santa Marta: Decretado en 1964 y ampliado en 1976. Presenta varios paisajes con alta biodiversidad. Existen reportes de cobertura de selva húmeda en el norte y en el oeste en épocas anteriores, aunque estos territorios fueron deforestados para la siembra de café, lulo, tomate de árbol y curubo, entre otros, además de algunas especies ilegales (coca) asociadas a grupos al margen de la ley (Inderena y Sánchez, 1990; Rangel y Garzón, 1995).

A pesar de ser zonas protegidas y de existir resguardos indígenas, el ecosistema SNSM se está deteriorando. Por ende, es necesario implementar programas de conservación, restauración y manejo adecuado de los recursos naturales.

Población

En la SNSM (*Gonawindúa*, en lengua indígena) han convivido desde tiempos prehispanicos cuatro grupos étnicos: wiwa, kankuamo, kogui y arhuaco. Estas culturas buscaron refugio en la parte alta de la montaña y gracias a esto aún sobreviven, reconocidas por la Constitución colombiana como grupos étnicos con gran trayectoria histórica en el ecosistema (Pro-Sierra, 1991). Estas comunidades le otorgan a la Sierra el eje de la vida único e inigualable, defendiéndola desde su conocimiento ancestral, abogando por la defensa de los recursos naturales y sus derechos humanos. Al respecto, Rodríguez y Mora (2010) anotan:

Los pueblos indígenas de la SNSM desarrollan sus prácticas de resistencia civil y cultural en un contexto de violencia política y social. En este sentido, han tenido que hacer frente a la presencia en sus territorios de múltiples actores (grupos armados legales e ilegales, empresas multinacionales y representantes de los sectores gubernamental y no gubernamental). Estos actores, de alguna u otra manera, han interferido en sus formas de vida y han generado en estas comunidades la necesidad de involucrarse en el universo jurídico, en aras de hacer uso de las herramientas legales para el reconocimiento, la defensa y la reivindicación de sus derechos (p. 173).

Para el territorio indígena, los principales Padres (Serankwa y Seinekun) son encargados de organizar el mundo material. Serankwa (el Padre) es el organizador y la autoridad, quien dejó asignadas las funciones a cada ser de la naturaleza, con normas y principios rectores de la armonía y la convivencia. Seinekun es el soporte, la tierra fértil (la Sierra misma) (Figura 2, donde la imagen central corresponde al cuerpo de Serankwa y Seinekun) (Giraldo, 2010).

Figura 2. Representación de la SNSM como territorio sagrado



Fuente: Giraldo (2010).

Por otro lado, en las estribaciones del sistema, en sus partes media y baja, convive un sinnúmero de mestizos que han venido ocupando y haciendo uso del territorio, forjando un sistema de asentamientos rurales producto de la colonización y del desplazamiento político social. Así se ha ido estableciendo un corredor de comunicación entre poblaciones como Guachaca-Minca y San Pedro de la Sierra, que presentan precariedad en servicios públicos ligados funcionalmente a Santa Marta, Ciénaga y Fundación. Estos habitantes, provenientes de diferentes regiones del país (antioqueños, santandereanos y guajiros), generaron una economía en torno a la producción del café, y su territorio es considerado una despensa agrícola local a la que se suman otros cultivos como los de maíz, yuca, cacao y hortalizas, entrelazados con bosque natural y plantado. No obstante, esta actividad agrícola y pecuaria ha alterado los suelos y, junto al turismo, ejerce presión sobre los recursos naturales de la Sierra.

Economía

La población indígena que habitó el antiguo territorio de la SNSM en el momento de la conquista española fue elevada, con agricultura altamente diversa en productos, comercio organizado, mano de obra abundante y calificada. Los asentamientos indígenas y las áreas para cultivo se concentraron en sectores bajos hasta los 1.300 m s. n. m., donde se plantaron maíz, yuca, frijol, ahuyama y batata como productos base de alimentación, y otros, como árboles frutales y miel de abejas, que también complementaban su dieta. Los métodos de producción agrícola de los indígenas muestran la intención de conservar el suelo con construcción de terrazas, utilización de curvas o zanjas de evacuación del agua y parcelas de descanso o rotación con cultivos mixtos, lo que contrasta con la agricultura colonial implantada años más tarde (Forero *et al.*, 2011).

Asimismo, la pesca se practicó en la bahía durante los meses lluviosos. También hay evidencias de que la recolección de sal se realizó como actividad estacional alterna a la agricultura, aprovechando las ventajas y la vocación del territorio (Gutiérrez, 2016).

Posteriormente, la colonización española traería enfrentamientos no solo físicos, sino ideológicos, por las diferencias en visiones respecto a los recursos naturales y la relación antrópica con el medio ambiente. Los españoles y demás colonizadores llegaron a la Sierra a implantar cultivos permanentes para extracción comercial y con el transcurso del tiempo despojaron a los indígenas, quienes, como resultado, se vieron obligados a cultivar terrenos alejados de sus poblados, en suelos pobres, en pro de su supervivencia. Los invasores, entretanto, desmontaron grandes áreas de bosque para expandir zonas dedicadas a potreros y cultivos, dando origen a procesos de erosión.

Hacia 1871, más de 150 exploradores y científicos llegaron a estudiar el ecosistema SNSM, y años después el Gobierno central estableció programas de poblamiento con colonos europeos en la Sierra, concediendo 2.500 ha a cerca de 1.200 colonos franceses. No obstante, muchos se enfermaron, por lo que regresaron a su país de origen.

Uno de los primeros agricultores que sembró café con fines comerciales fue el francés Pedro Cothinet en 1973, y para la misma época se destacó la producción agrícola de caña

de azúcar en la hacienda Minca, localizada en estribaciones de la Sierra. A finales del siglo XIX, el café de la SNSM fue reconocido a nivel nacional por sus características especiales. En ese sentido se destaca la producción de la hacienda La Victoria, que, por su ubicación, la calidad y el tamaño del grano obtenido, fue referente en la región. Luego, durante la época de la violencia política en Colombia (1940 a 1960), se desplazaron desde el interior familias provenientes de Santander, Antioquia, Valle del Cauca y del Tolima, quienes adoptaron la caficultura y dieron origen a las primeras comunidades cafeteras (Krogzemis, 1967, citado por Vilorio, 2019).

De igual forma, hacia el norte de la SNSM, entre 1896 y 1920 se instalaron cafetales, impulsados por empresarios extranjeros, y poco a poco se consolidó la caficultura comercial, por la que se abrieron caminos peatonales. No obstante, debido al mal estado de las vías de acceso, los hijos de los hacendados cafeteros no lograban trasladarse a los colegios de Santa Marta. Un ejemplo fue el caso de la familia Flye, que contrató a profesores del exterior para residir en la hacienda, donde no solo dictaban clases, sino que identificaban flora y fauna e incluso colaboraban en algunas labores agrícolas, incorporando tecnología en las fincas más reconocidas. Como ilustración de este proceso se encuentran las haciendas Eva Blanot, Cincinnati y California. Particularmente, esta última construyó la carretera a Palmor en la década de los sesenta, obra que convertiría años más tarde a Ciénaga en el municipio cafetero del Magdalena. Lastimosamente, estos centros productivos quedaron abandonados por diferentes motivos; entre ellos, violencia y asesinatos selectivos perpetrados por grupos armados.

Con el auge de la marihuana en la década de los sesenta, muchos colonos incursionaron en el negocio y sembraron en el interior de la Sierra, llegando a regiones remotas que hasta entonces habían permanecido deshabitadas. La tala de áreas extensas de bosque para este cultivo agravó los problemas de uso del suelo y deterioró aún más los recursos naturales. Por otro lado, la ubicación geoestratégica de la SNSM, gracias a su cercanía al mar y a cabeceras municipales relevantes, fue base para que los primeros frentes de las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia-Ejército del Pueblo (FARC-EP), el Ejército Popular de Liberación (EPL) y el Ejército de Liberación Nacional (ELN) se establecieran en las vertientes occidental y nororiental. Seguido a esto, surgieron las autodefensas en la región, situación que trajo enfrentamientos y acrecentó un problema que aún es latente. La población indígena fue la más afectada y, nuevamente, se vio desplazada a zonas más altas y agrestes (ProSierra, 1991; Vilorio, 2019).

A partir de la Ley de Justicia y Paz (2005), se impulsaron la caficultura y el turismo en la SNSM. Gracias a esto, se vincularon familias tradicionales del departamento y se modernizó la economía cafetera, la cual ha venido evolucionando de conformidad con las características del paisaje, apoyada por la labor gerencial en los Comités Departamentales de Cafeteros. Como resultado, en el año 2018 se obtuvieron 13.000.000 de kilogramos de café pergamino seco en los municipios de Santa Marta, Ciénaga, Fundación y Aracataca, en 5.233 fincas y 4.812 familias cafeteras. Esta actividad fue impulsada positivamente por las cooperativas,

lo que generó optimismo en los productores (Comité Departamental de Cafeteros del Magdalena, 2019; Vilorio, 2019).

Es indiscutible que el sector agrícola genera procesos de deforestación y cambio en las coberturas de los suelos. Además, gran parte de este fenómeno se acentúa al ampliar la frontera agrícola para aumentar la oferta de alimentos. No obstante, mediante la tecnificación agrícola y la incorporación de lineamientos de protección se puede lograr revegetalizar y producir sin necesidad de ampliar las zonas intervenidas.

Expandir las áreas agrícolas a costa de acabar territorios naturales no ha solucionado la demanda de alimentos y, por el contrario, se hace más insostenible el sector agropecuario. Por lo tanto, conviene tener presente que la vocación de la zona ecuatorial es mantener el suelo cubierto, protegido de la lluvia y el sol, y entremezclar especies, fundamento esencial que plantea la agroecología. De hecho, de acuerdo con el entorno geomorfológico y socioeconómico del territorio de Colombia y en especial de las áreas cafeteras en la SNSM, el sombrío favorece la producción, la conservación del suelo, la biodiversidad y el agroecosistema que, unido a la asistencia técnica, ha sido el sostén de los pequeños agricultores.

La producción de café de la SNSM es reconocida bajo el sello «Ecotopos Cafeteros N.º 4», que por su ambiente perfecto da al grano un aroma y un sabor suaves. En este ecosistema la mayor parte de las familias cafeteras cultivan el grano en parcelas menores a las 2 ha, por lo que la Federación Nacional de Cafeteros ha adoptado acciones conjuntas en las dimensiones social, económica y ambiental para alcanzar resultados sostenibles en el tiempo. Es importante mencionar que estos campesinos en particular manejan sus cafetos con una tecnología tradicional, bajo los árboles frutales (guamas, aguacate, guanábana, cítricos, entre otros) y algunas especies nativas como cedro, guayacán costeño, caimito, guarumo, carbonero, higuierón, laureles, encenillo y otros.

Con lo anterior no se pretende fomentar la agricultura o específicamente el cultivo del café en áreas de la SNSM, pero tampoco se puede desconocer que una parte de la dinámica social y económica de este ecosistema gira en torno de dicha cadena productiva, al punto que es reconocida como unas de las capacidades de investigación, desarrollo e innovación (ID+I) disponibles en el departamento. Ahora bien, esta cadena se puede conjugar con la de cacao y sus derivados, la hortofrutícola, que hace parte del macrosector agroindustria, o con otros sectores como el turismo (Gobernación del Magdalena, 2013), constituyéndose en un eje transversal de desarrollo que debe potencializarse y seguir incorporando buenas prácticas agrícolas para consolidarse a nivel nacional.

Ecosistema estratégico

El departamento del Magdalena presenta alta vulnerabilidad frente al cambio climático. Las razones de esto se atribuyen a su localización en el norte de Colombia, donde ejercen efecto la influencia del mar, la posición astronómica de la zona ecuatorial (temperaturas elevadas) y el clima intertropical inestable, por lo que es sometido a fenómenos ciclónicos

del Caribe donde la presencia de fuertes vientos y fuertes lluvias tienen como consecuencia el incremento de la erosión del litoral e inundaciones en el territorio. Además, su topografía y los suelos son expuestos a la brisa marina seca y caliente, que arrastra y acumula sales al interior. Todas estas variables, entre otras, son las que en el tiempo acarrearán cambios en la temperatura y patrones climáticos.

En este contexto se ubica estratégicamente la SNSM, la cual es barrera natural a la circulación de los vientos alisios provenientes del noreste y ayuda a mantener el régimen hídrico de buena parte de la región norte de Colombia (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas [CIOH], 2020). La presencia de esta majestuosa montaña cambia las condiciones ambientales del Magdalena y hace que las precipitaciones varíen desde 250 mm en las zonas más secas hasta los 4.000 mm en las más frías. Los bosques de la Sierra moderan el clima local y mantienen el ciclo hidrológico a partir de la transpiración de las hojas, conservando el ambiente húmedo del páramo en la parte alta del ecosistema.

La SNSM es la principal fuente de agua para los departamentos de Magdalena, La Guajira y Cesar. Los ríos que nacen en ella producen más de 10.000 millones de metros cúbicos de agua al año, que son fuente de agua para millones de personas (Viloria, 2005). En total, son 35 ríos los que brotan de la Sierra, de los cuales 16 nacen en el parque, y se calcula que existen no menos de 700 microcuencas. No obstante, la intervención antrópica, combinada con el fenómeno del cambio climático, ha mermado el ecosistema. Por ejemplo, los periodos severos de El Niño han afectado la costa Caribe y, concretamente, al departamento del Magdalena y su capital, Santa Marta, que a pesar de abastecer su acueducto de varios ríos (Piedras, Manzanares y Gaira), no cuenta con líquido suficiente en época seca para satisfacer la demanda de la población. Este es uno de los casos más evidentes que reflejan la carencia de manejo integrado y gestión del recurso hídrico, así como la degradación del ecosistema.

Respecto a lo anterior, un estudio publicado en la revista *Science* (Le Saout *et al.*, 2013) señaló 173.000 áreas protegidas del planeta que tenían la mayor concentración de biodiversidad y estaban amenazadas; entre ellas, la SNSM, uno de los ecosistemas que, según los investigadores, no se pueden reemplazar. A su vez, llama la atención sobre el hecho de planes de manejo local que se centran en especies emblemáticas, pero no favorecen a especies particulares que pueden estar en peligro de extinción.

Es evidente la urgencia de adoptar estilos de vida con menos impacto sobre los recursos naturales, especialmente en la SNSM, y prácticas de gestión encaminadas a lograr un mejor desarrollo. Por lo tanto, es pertinente fomentar la cultura del conocimiento y la aplicación tecnológica (ID+I) para cumplir los objetivos de conservación y uso sostenible de los recursos naturales. Se trata, en definitiva, de una labor colectiva que, acompañada de la normativa ambiental y de gobernanza, puede mostrar un mejor camino para la gestión ambiental de ecosistema y la vida de las comunidades que allí habitan. Es preciso recordar que el deterioro ambiental de la Sierra traerá consecuencias no solo locales, relacionadas especialmente con el abastecimiento hídrico, sino nacionales y globales ante la pérdida de biodiversidad.

¿Quién gobierna la Sierra?

La gobernabilidad de la SNSM es muy compleja y confusa. En esta participan 21 alcaldes, tres gobernadores (Magdalena, Cesar y La Guajira), tres corporaciones autónomas regionales (Corpamag, Corpocesar y Corpoguajira), además de Parques Nacionales con dos áreas protegidas y nueve resguardos indígenas. A ellas se les pueden sumar los grupos al margen de la ley, que no se identifican, pero están asentados en el territorio. Ejemplo de esto son las Autodefensas Gaitanistas de Colombia (AGC) y el Clan del Golfo, que siguen amedrentando a la población, como en el caso de Palmor, Ciénaga, cuyos habitantes están confinados por cuenta del grupo narcoparamilitar. En síntesis, los planes de gobierno y los intereses de cada grupo que hace presencia en la zona divergen, por lo que no existe una ruta clara de trabajo en el territorio.

Ciencia, tecnología, desarrollo social y bioeconomía

El éxito de la economía de un territorio depende de la capacidad que sus habitantes tengan para transformar el conocimiento e impactar el bienestar de la comunidad. Tal como afirma Echevarría (2002), «el conocimiento es base del desarrollo» (p. 307), y las tecnologías —entre ellas, las de la información— constituyen un elemento transversal que impacta la política y los programas gubernamentales, fomentando el desarrollo equitativo y sostenible en las regiones (Rodríguez *et al.*, 2019). El conocimiento genera cambio del enfoque político económico y social de los Estados, y es el fundamento para impactar la realidad (Iturralde, 2019). De acuerdo con esto y desde la historia, se reafirma la importancia del conocimiento y la tecnología para generar una estructura económica, administrativa y social que armonice el territorio y esté sustentada por las ciencias básicas (biología, geografía, componente edáfico, entre otras), que respaldan la conformación social y las dinámicas de articular desarrollo y bienestar.

Las condiciones socioeconómicas, productivas y sociales de Latinoamérica, y en especial de Colombia, comprueban la necesidad de generar conocimiento y su aplicación en la resolución de problemas de contexto, fomentando el bienestar social sin comprometer los recursos naturales, como estrategia para enfrentar el cambio climático. Ahora, si bien la ciencia y la tecnología son un producto social e histórico que determina factores culturales y políticos (Cantú-Martínez, 2017), también pueden ser una forma de exclusión social al generar brechas que diferencian la clase o el estatus de un individuo que posee dichos activos respecto a los demás (Robert, 2015). Por este motivo, a pesar de que América Latina y el Caribe constituyen una de las regiones más ricas en recursos, su población presenta altos índices de pobreza, con diferencias políticas y económicas marcadas que reflejan grandes problemas sociales. También se presenta poca inversión estatal respecto a ciencia y tecnología, lo que merma el desarrollo productivo, evidenciando una baja a nula presencia internacional y generando dependencia económica (Ramírez, 2019).

En América Latina, la ciencia, tecnología e innovación tienen una relación directa entre generación, intercambio y transferencia de conocimiento. Así pues, esta matriz puede llegar a explorar posibilidades del desarrollo sostenible en una región que, por su contexto biofísico (biodiversidad), necesita no solo producir conocimiento científico y tecnológico, sino fortalecer la vocación del territorio. Por ello, es preciso fomentar ciencia con tecnología al servicio de los recursos naturales y el bienestar de la población.

Las tendencias actuales de desarrollo demuestran el anterior planteamiento. Hoy, desde el conocimiento, se buscan alternativas que frenen el deterioro ambiental, lo que demanda diferentes perspectivas y romper paradigmas sociales y económicos. Desde esta visión, la bioeconomía responde a las demandas sociales de seguridad alimentaria, ambiente sano, adecuada gestión de recursos y adaptación al cambio climático. Sin embargo, es a su vez un proceso social, que exige un compromiso político en función de realidades y capacidades territoriales (Global Bioeconomy Summit [GBS], 2015; Hodson, 2018).

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal) sintetizó las estrategias para el desarrollo de la región, y en la Agenda 2030 se ratifica la visión regional de desarrollo para América Latina, donde la bioeconomía (proceso de transformación social, dinámico y complejo, que exige una perspectiva de política a largo plazo), se evidencia como una opción de desarrollo integral de los territorios basada en cuatro pilares (Rodríguez et al., 2019):

- Promover el desarrollo sostenible, teniendo como marco de referencia la agenda 2030;
- Promover la acción climática, teniendo como marco de referencia el Acuerdo de París y lo planteado por los países en sus contribuciones determinadas nacionalmente
- Promover la inclusión social y la reducción de las brechas territoriales de desarrollo al interior de los países y
- Promover procesos de innovación que contribuyan a la diversificación de las economías y a generar nuevas cadenas de valor, especialmente de aquellas que contribuyen al desarrollo regional, se ubican en segmentos de mercado de alto crecimiento, o brinden oportunidades a los jóvenes y a las mujeres

Asimismo, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) plantea la bioeconomía como una estrategia sólida de uso más eficiente de los recursos, las tecnologías y los procesos biológicos para la provisión de bienes y servicios. Este enfoque exhibe un camino viable para hacer frente a las nuevas demandas de producción y consumo más acordes con los Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS) (Hodson *et al.*, 2019).

El territorio de Colombia está entre las 12 naciones más megadiversas del planeta (Minciencias, 2016). El país se ve privilegiado por sus riquezas naturales, su variedad geográfica y la diversidad de sus ecosistemas. Además, a este patrimonio natural se le suma la diversidad cultural, que incluye cerca de 66 lenguas locales diferentes del español. Ante este contexto, debería repensarse entonces el desarrollo del territorio.

No obstante, si se aborda la definición de desarrollo sostenible y se analiza la corta evolución de la bioeconomía, ya se presentan diversos enfoques, como los descritos por Bugge *et al.* (2016): el de biorrecursos, el de biotecnología y el de bioecología. La visión de los recursos biológicos o biorrecursos se centra en el papel de la investigación, el desarrollo y la demostración (I+D) y se relaciona con los insumos biológicos en sectores como la agricultura, recursos marinos o forestales y la bioenergía. La bioecología, por su parte, se basa en la sustentabilidad, la biodiversidad, la conservación de ecosistemas, la degradación edáfica y la comercialización de biorrecursos —lo que implica contar con códigos de ética— y la bioproducción para la generación de energía.

Aunque se ha avanzado en una visión más sostenible en Colombia, la mayoría de los proyectos bioeconómicos del país se han centrado en el mercadeo y en la rentabilidad de nuevos bioproductos con enfoque técnico-productivo de bienes y servicios que aprovecha las funcionalidades biológicas y energéticas de la biomasa. Un ejemplo de esta tendencia se observa en el sector industrial de bioetanol, que tiene su base en los ingenios azucareros que migraron a esta nueva estrategia mercantil donde la participación social es baja y los beneficios ambientales se reducen.

Así, a pesar de que la bioeconomía es tendencia mundial para alcanzar el cumplimiento de los ODS (mitigación del cambio climático, seguridad alimentaria, eficiencia energética y bienestar humano equitativo), es conveniente elaborar estrategias y modelos políticos, financieros y culturales para amparar las prioridades de conservación de recursos naturales, así como para fortalecer el desarrollo de subsectores bioeconómicos de otros productos con miras a mejorar la productividad agrícola y el bienestar humano, que depende del adecuado manejo de los recursos (Aguirre, 2022).

En resumen, desde la sostenibilidad ambiental y social, es urgente conocer y valorar la función ecosistémica de los recursos naturales, evaluar el impacto del cambio de uso del suelo, establecer buenas prácticas agrícolas que incluyan acceso a tecnologías limpias, e incorporar el conocimiento indígena y la identidad cultural. Cumplir con los Objetivos de Desarrollo del Milenio a la luz de estas premisas puede ser la clave para asumir los efectos de cambio climático, ligados a problemas en el suministro sostenible de servicios de los ecosistemas y ante los cuales quienes resultan más vulnerables son los pobres del ámbito rural.

En este orden de ideas, cabe tener presente lo que la degradación de los servicios ecosistémicos genera:

- Inseguridad alimentaria.
- Reducción de biodiversidad.
- Daño significativo al bienestar humano por costos económicos y de sanidad pública.
- Migración de población.
- Problemas ligados a la carencia de agua para el suministro sostenible de recursos básicos.
- Menor calidad de aire.

- Aumento de la población de zonas urbanas, con un incremento insostenible de residuos y de afectaciones a la calidad del aire y del agua.
- Daño en el paisaje.
- Degradación de suelos (lo que implica afectación de las redes tróficas), con problemas de infiltración, retención, absorción y lixiviación de elementos nutrientes.
- Daños a infraestructura, entre otros.

La interconexión entre bienestar y servicios ecosistémicos es directa (Figura 3). Sin embargo, aún no se han cuantificado las afectaciones y los impactos del deterioro de los sistemas naturales sobre las sociedades humanas, si bien algunos los describen como invaluable (Himes-Cornell *et al.*, 2018). De cualquier forma, es indiscutible que una adecuada gestión de los recursos naturales, atendiendo a su complejidad y a las múltiples interacciones que rigen su dinámica, debe ser abordada desde una perspectiva interdisciplinar, posibilitando la integración de las nuevas tendencias que respondan a la necesidad de salvaguardar los recursos naturales para mantener un equilibrio social, toda vez que ecosistemas menos productivos (como los desiertos o las montañas escarpadas) traen desigualdad social.

Figura 3. Reciprocidad del bienestar y servicios ecosistémicos



En definitiva, la conservación de la biodiversidad es fundamental. Existe evidencia de que todas las especies desempeñan un papel en el funcionamiento del ecosistema y contribuyen de forma directa al bienestar humano. Por lo tanto, cuanto más biodiverso sea un sistema, mejores serán su funcionamiento y su resiliencia (De Groot *et al.*, 2002).

Ahora bien, el nivel de afectación de las actividades que se realizan sobre los ecosistemas depende de cómo la sociedad los percibe y del tipo de conocimiento y desarrollo para valorar y utilizar el ambiente natural (territorio). En síntesis, estos impactos se determinan según el enfoque de sistemas socioecológicos de las ciencias ambientales (Cerón *et al.*, 2019). En este sentido, urge desarrollar modelos tecnológicos y adoptar nuevos paradigmas de gestión que contribuyan a salvaguardar los recursos naturales en favor de las futuras generaciones, que dependen en buena medida de la conservación de los ecosistemas (conservación para el bienestar social).

Principales investigaciones en torno al ecosistema de la SNSM

La evidencia científica es una de las herramientas más contundentes que muestran la intervención antropogénica en el territorio. Una revisión de las principales publicaciones científicas de la SNSM es una radiografía de la historia y la realidad del ecosistema. Del mismo modo, permite establecer una línea base de desarrollo y ampliar el enfoque del lector respecto a las expectativas y la tendencia del territorio según sus características biofísicas y el contexto sociocultural. Considerando lo expuesto, se recopiló la información científica en torno a la Sierra para su respectivo análisis.

A la fecha, no se ha realizado un análisis de red bibliométrica y sistemática de la literatura que verifique los principales avances y desafíos en la SNSM, a pesar de que estos tipos de análisis son interesantes debido a que proporcionan información sobre el crecimiento de literatura y el flujo del conocimiento. En esta revisión de estudios de SNSM se identificaron los artículos científicos publicados hasta la fecha, partiendo del año 1879. Así, consecutivamente se estableció una ventana de tiempo de los últimos diez años con el fin de ayudar a explorar, organizar y analizar datos que sirven de base a investigadores en el proceso de toma de decisiones, construcción de planes estratégicos, investigaciones futuras, entre otras.

La ecuación de búsqueda se construyó de acuerdo con la metodología propuesta por Cruz-O'byrne *et al.* (2021) y se seleccionó la base de datos especializada Scopus de Elsevier, donde se utilizaron como palabras clave «Sierra Nevada de Santa Marta» en el campo de búsqueda (TITLE-ABS-KEY), con limitación documental de solo artículos científicos. De esta forma se obtuvo la siguiente fórmula:

TITLE-ABS-KEY ("Sierra Nevada de Santa Marta" OR "Sierra Nevada of Santa Marta")

Del total de artículos existentes relacionados con la SNSM (357), en el año 2021 se presentó la mayor producción científica (34 documentos). En el año 2020 se encontraron 31 documentos, y el 2015 registró 26. Colombia lidera las investigaciones en esta materia, con 263 estudios, algunos en coautoría con científicos internacionales, seguido de Estados Unidos (79), Brasil (22) y Alemania (17). Por otra parte, en la Tabla 1 se diferencian las 23 áreas de conocimiento en las que se enmarcan estas publicaciones; entre ellas, ciencias agrícolas

y biológicas reflejan el mayor número de trabajos sobre la Sierra (213: 59,7 %). En cuanto a revistas científicas, la tabla 1 muestra que, de los 152 artículos hallados, la mayor cantidad se encuentran en la revista *Zootaxa* (16: 21,3 %).

Tabla 1. Áreas del conocimiento con mayor número de publicaciones sobre la SNSM y revistas científicas con mayor publicación en el tema

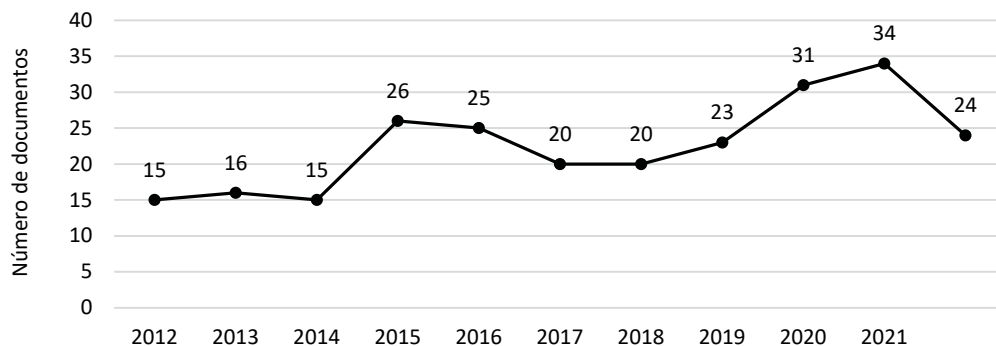
Área de conocimiento		Revistas científicas	
Área	N.º de publicaciones	Recurso	N.º de publicaciones
Ciencias agrícolas y biológicas	213	<i>Zootaxa</i>	16
Ciencias de la Tierra y planetarias	78	<i>Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras</i>	13
Ciencias ambientales	78	<i>Journal Of South American Earth Sciences</i>	10
Ciencias sociales	52	<i>Revista de Biología Tropical</i>	10
Artes y humanidades	35	<i>Acta Biológica Colombiana</i>	9
Otras (18)	89	Otros (147)	243

Fuente: elaboración propia a partir de datos de Scopus.

Al evaluar la filiación de los autores de las investigaciones, se encontró que la mayor proporción corresponde a la Universidad del Magdalena, seguida de la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de los Andes, la Universidad de Antioquia y la Pontificia Universidad Javeriana. Asimismo, se reporta la presencia de institutos de investigación. En este caso, cabe aclarar que una misma publicación puede tener diferentes afiliaciones, por lo que la sumatoria de los documentos fue mayor al número de resultados.

Al cerrar la ventana de observación a los últimos diez años, se encontró un total de 249 artículos (Figura 4). Según el área, estos resultados se distribuyen de la siguiente manera: 145 se enmarcaron en ciencias agrícolas y biológicas; 56, en ciencias ambientales; 51, en ciencias de la Tierra y planetarias; 40, en ciencias sociales; 32, en artes y humanidades, y 68, en otras.

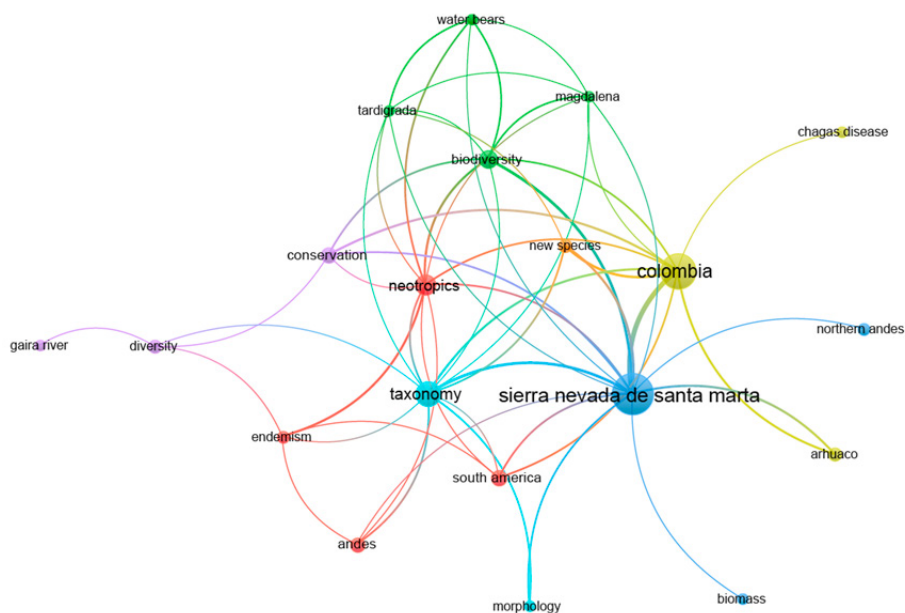
Figura 4. Distribución cronológica de estudios en la SNSM 2012-2022



Fuente: elaboración propia a partir de datos de Scopus.

Las líneas de investigación y sus aplicaciones se establecieron a través de un mapa de redes de coocurrencia de palabras clave de autor, elaborado mediante el software VOSviewer v1.6.17 (Figura 5), considerando un mínimo de cuatro ocurrencias. Como resultado, se registraron 20 términos agrupados en clústeres, correspondientes a seis líneas de investigación. El clúster rojo tiene cuatro términos; el verde, tres; el azul, cuatro; el amarillo, tres; el violeta, tres, y el azul claro, tres. Cabe mencionar que el tamaño más grande de los nodos pertenece a la palabra clave con mayor frecuencia de aparición, en este caso «Sierra Nevada de Santa Marta», del grupo verde, que está interconectada con los demás grupos.

Figura 5. Mapa de redes de coocurrencia de palabras clave de autor



Fuente: elaboración propia a partir de datos de Scopus.

A partir de los clústeres, se pueden deducir varias líneas de investigación, entre las que sobresalen: endemismo en los Andes en Suramérica (neotrópico), biodiversidad de tardígrado (osos de agua) en el Magdalena, biomasa de la SNSM al norte de los Andes, la enfermedad de chagas en los arhuacos en Colombia, conservación de la biodiversidad en el río Gaira, morfología y taxonomía (caracterización de especies), y descubrimiento e identificación de nuevas especies.

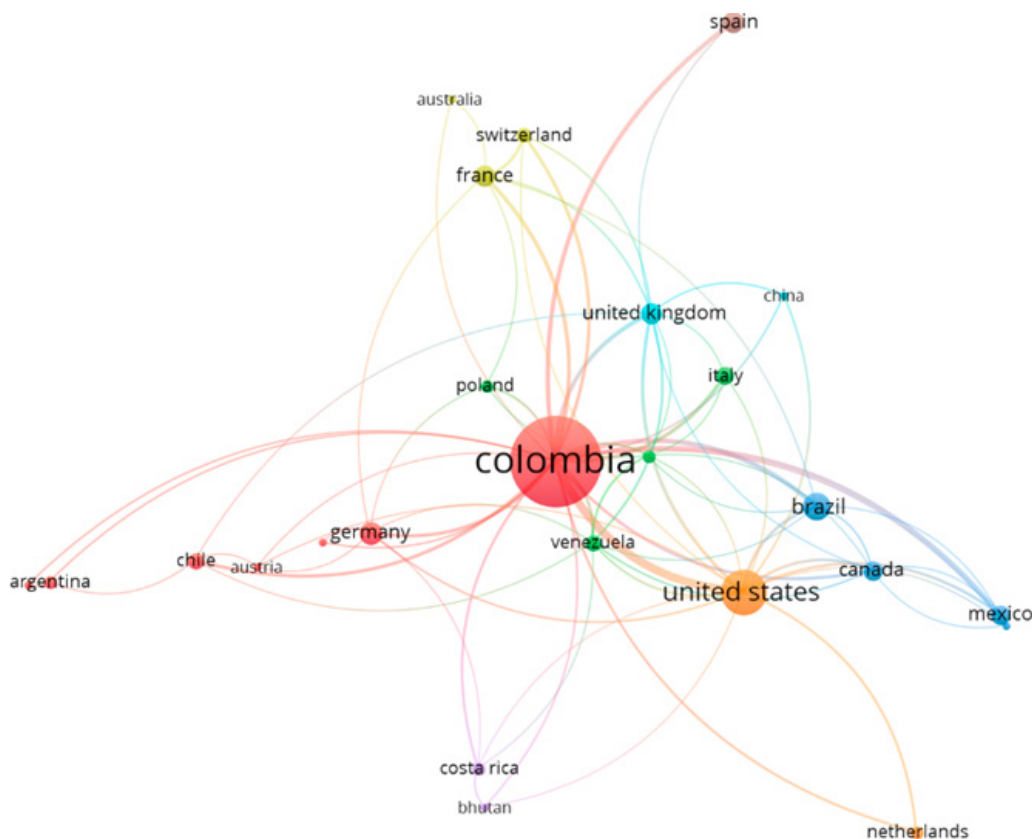
Como se aprecia en los análisis realizados, las principales temáticas que tratan las publicaciones hacen referencia a ciencias agrícolas y biológicas (45 %); el 14 %, a ciencias de la Tierra; otro 14 %, a ciencias ambientales; 6 %, a artes y humanidades; 4 %, a medicina, y 3 %, a química y bioquímica. Precisamente, dentro del primer grupo se encuentran estudios de plagas y enfermedades que afectan a los principales cultivos en la zona como los de café y cacao, además de descripciones de diferentes especies de insectos, mamíferos, tardígrados, abejas, entre otros. Para el caso de ciencias de la Tierra, sobresalen trabajos en variabilidad climática, disponibilidad hídrica, litología, estratigrafía, morfología, evaluación de geoquímica y procesos de denudación y sedimentación. A nivel ambiental, se destacan las investigaciones de disponibilidad hídrica, efectos del cambio climático (vulnerabilidad), manejo ecológico de plantaciones, conocimientos ancestrales, erosión y sus efectos, diversidad de especies (pájaros, ranas, etc.), efectos de las labores pecuarias en la Sierra, entre otros. En general, los procesos ambientales, el cambio climático y los procesos agrícolas en la SNSM son temas discutidos en cada uno de los estudios de caso que se mostrarán en capítulos posteriores.

En términos de producción por nacionalidad, Colombia es el país que presenta más documentos y el que más interacciones tiene (200). Le siguen Estados Unidos (36), Brasil (12), México y España (10), Reino Unido (9), Francia e Italia (8) (Figura 6).

La metodología aplicada refleja la estructura temática y muestra el tema y los grupos disciplinares más representativos en una forma gráfica. Así se facilita la interpretación de la cobertura documental de la SNSM, base para identificar relaciones y conceptos (de congruencia, estabilidad, objetividad, repetitividad, entre otros) tenidos en cuenta para interpretación y su análisis.

A partir del estudio realizado, se consolida la investigación realizada en la SNSM mediante el uso de redes bibliométricas estructuradas, lo que sirve como línea base para complementar las revisiones existentes en las revistas científicas, su distribución cronológica, los autores y obras más influyentes. De este modo se aprecia el alto número de publicaciones en los últimos años, lo que denota un alto interés por el ecosistema, situación que requiere seguimiento y análisis para lograr el desarrollo sostenible de la SNSM.

Figura 6. Mapa de redes de coautorías: países (– denota cooperación internacional)



Fuente: elaboración propia a partir de datos de Scopus.

Reflexión y análisis

El conocimiento puede constituir el factor central para el desarrollo en la sociedad al romper paradigmas y al explicar y mostrar la posible evolución de la comunidad y de los problemas de los modelos económicos que no identifican interés social. Sin embargo, es preciso advertir que no existe una visión única y universal; cada modelo es un desafío de desarrollo sectorial en un determinado contexto. En todo caso, uno de los retos actuales es garantizar la sostenibilidad ambiental y sociocultural.

Un apartado mostró que los procesos antrópicos liderados desde la colonización en torno al territorio, y específicamente a la SNSM, fueron guiados con intervención nacional e internacional y potencializados a través del Estado, bajo una visión centralista con expectativas económicas de un modelo neoliberal sin tener en cuenta las características biofísicas del ecosistema. De esta forma se han generado conflictos ambientales y se han impulsado problemas de intervención forzada en algunas etnias con procesos de segmentación y exclusión social.

Sin pretender defender el anterior panorama, vale la pena considerar que seguramente la carencia de conocimiento de la época agudizó el constante deterioro de los recursos naturales, hipótesis que conservan los hermanos mayores que habitan la Sierra (etnia arhuaca):

Estamos en un mismo plano en el mundo, y aunque parezcamos extraños, coincidimos en el tiempo y en la vida y compartimos [los arhuacos] la intención de que el mundo esté bien. Hemos conversado y esas palabras han sido registradas; ahora estamos sintonizados. La Sierra y nosotros los estaremos esperando para cuando nos visiten (S. Arimakú, comunicación personal, 7 de octubre de 2015).

Una conciencia social ambiental para minimizar procesos de degradación (desforestación, salinización, desertización, pérdida de biodiversidad, entre otros) debería emerger ante el conocimiento del sistema. No obstante, las actividades productivas siguen ejerciendo presión sobre la Sierra, y ni la normativa ambiental ni los procesos de educación han fomentado un mejor uso de los recursos naturales y el reconocimiento de los servicios ecosistémicos que ella entraña. Los resultados en el área de estudio muestran asentamientos con tierras de cultivo y bosques intervenidos a través del tiempo donde la tendencia de degradación se mantiene, con un deterioro que pone de manifiesto la pérdida de servicios estratégicos para la vida y el bienestar de la comunidad.

Por lo tanto, sensibilizar y divulgar sobre el manejo adecuado de los recursos naturales y gestionar el uso sostenible es primordial para conservar y proteger el ecosistema. A su vez, adecuar tecnologías sin desconocer la vocación del territorio requiere conocimiento holístico del entorno natural y entender las dinámicas sociales en pro de la seguridad alimentaria de sus habitantes y los cambios de producción para la adaptación y mitigación al cambio climático.

No se debe olvidar que la ciencia y la tecnología bien aplicadas son herramientas que permiten potencializar la producción, focalizar la gestión y el desarrollo rural, y fomentar el uso eficiente del suelo rural agropecuario sin ampliar la frontera agrícola, contribuyendo así a estabilizar los ecosistemas y disminuir los conflictos. Por ende, el fomento de las prácticas agrícolas sostenibles, los cultivos mixtos y los agrosistemas familiares es una tarea fundamental para mantener el bienestar de la comunidad rural y detener la cota de expansión agrícola. En esa medida, restablecer en lo posible la composición y estructura en función de la biodiversidad es uno de los retos que se deben asumir desde la gobernanza.

Desde esta perspectiva, el conocimiento y la apropiación tecnológica son instrumentos de protección de recursos biológicos que, sumados al acceso y la divulgación de la información mediante TIC, pueden fomentar la transformación socioeconómica reconociendo la importancia de la SNSM como cuna de recursos naturales, asegurando a su vez su preservación y su adecuado uso. También es preciso contar con la intervención del Estado a través de infraestructura (vivienda, saneamiento básico, salud y educación), de forma que se mejoren las condiciones mínimas de vida de los 400.000 campesinos asentados en la Sierra, de los cuales 5.042 familias se dedican a la producción del café.

Asimismo, se debe considerar que, a diferencia de los indígenas, quienes son guardianes naturales de los ecosistemas (Ulloa, 2004), los colonos contribuyen a la destrucción de la biodiversidad (Ojeda, 2012). Así las cosas, esta población, en particular la asentada en el corredor de conectividad que une los corregimientos de Guachaca, Minca y San Pedro de la Sierra, se ve impactada en la actualidad por la deforestación, la contaminación de corrientes hídricas, la erosión de suelos, la localización inapropiada de cultivos, el sobrepastoreo y el manejo insostenible de recursos. Frente a estas problemáticas, es necesario establecer alternativas que mejoren la producción y la gestión ambiental (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], s. f.). Algunos ejemplos de ellas son los siguientes programas estatales que han sido reconocidos a nivel internacional:

- Ampliar el sistema de áreas protegidas en la SNSM.
- Aumentar las reservas forestales (Ley 2.^a de 1959, referente del ordenamiento y gestión ambiental del territorio).
- Promover programas de manejo sostenible, rehabilitación y restauración de ecosistemas de la alta montaña y gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos.
- Implementar la Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible y de Humedales.

Otras iniciativas son resultado del conocimiento y la comprensión del fenómeno en contextos biofísicos:

- Implementar sistemas de producción agrícola sostenibles (agroforestales, silvo-pastoriles o agrosilvoforestales) que minimizan el impacto de la actividad.
- Innovación y desarrollo tecnológico para implementar sistemas de monitoreo de fenómenos climáticos (temperatura, brillo solar, concentración de gases efecto invernadero [GEI], entre otros), diseño de motores eléctricos para vehículos, iluminación LED, bioenergía con tecnología de captación de CO₂, producción de energía alternativa (solar, eólica, térmica, entre otras).

Sin embargo, aún se requiere más información de los efectos del cambio climático sobre las comunidades, pues este insumo puede facilitar cambios de actitud y el entendimiento de que dicho fenómeno tiene repercusiones socioeconómicas en los asentamientos humanos y en las condiciones de vida. En efecto, según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2012), la innovación tecnológica con visión extractivista y de degradación de los recursos naturales a nivel global trae como consecuencia la reducción en el bienestar social. En este sentido, la inversión en investigación e innovación teniendo en cuenta la conservación ambiental en el contexto territorial es fundamental para lograr la transición hacia economías más sostenibles. De esta forma será más sencillo adoptar medidas que marquen el bienestar colectivo en el futuro.

El desarrollo sustentable, por lo tanto, demanda investigación y transferencia tecnológica. Por lo tanto, la educación resulta clave, pues permite mejorar la capacidad técnica del país y lograr las metas de productividad. La universidad, en particular, surge como un actor importante para el progreso regional en la medida en que puede proponer sinergias con los actores locales, realizando proyectos de desarrollo tecnológico que mejoren los índices de bienestar de las comunidades rurales de la SNSM sin desligar la preservación de los recursos naturales.

A continuación, se presentarán dos de estos proyectos de desarrollo tecnológico y capacitación que pueden darle sostenibilidad al ecosistema de la SNSM a la vez que se mantiene su productividad. Por un lado, se encuentra la iniciativa «Sistema de generación híbrido solar-eólico para brindar servicios de primera necesidad en instituciones educativas distritales de las zonas rurales», llevada a cabo en la institución educativa La Revuelta, y, por otro lado, «Innovación para el desarrollo tecnológico en la cosecha de café Innocafé», que permitió validar y estimar el nivel de adopción tecnológica para la cosecha asistida de café en cuatro municipios productores.

Conclusiones

En virtud de lo expuesto en este capítulo, se puede afirmar:

- El ecosistema de la SNSM es estratégico para regular el clima del norte de Colombia, salvaguardar el agua, conservar la biodiversidad, compensar procesos ecológicos de depuración y mantener los suelos. Este ambiente contribuye además con una oferta de bienes y servicios ambientales esenciales para el desarrollo humano, soporta procesos productivos y establece relaciones simbólicas culturales territoriales esenciales para la comunidad indígena.
- Sin duda, la alteración del ecosistema de la SNSM constituye una grave amenaza ambiental.
- Es necesario seguir generando conocimiento y socializarlo para fortalecer la gestión y el manejo del ecosistema de la SNSM con discernimiento efectivo y con una visión sociopolítica y económica-global que permita posicionarlo para establecer estrategias de conservación.
- Es indudable que la intervención antrópica ha deteriorado a la SNSM. Varios trabajos de investigación han abordado el problema desde diferentes áreas del conocimiento, pero es evidente que se requieren investigaciones multidisciplinarias para afrontar el problema en toda su complejidad.
- Las tecnologías y la innovación del conocimiento avanzan rápidamente en la mayoría de las disciplinas, pero estos progresos deben ser beneficiosos para custodiar los recursos naturales en estas condiciones. Las alternativas ante la crisis ambiental de la SNSM deben ser viables de forma que, independientemente del modelo o la ideología económica, la tecnología garantice la preservación de la vida.

Referencias

- Aguirre, V. M. (2022). *Bioeconomía y su contexto en Colombia*. Editorial Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/26530/Bioeconom%C3%ADa%20y%20su%20Contexto%20en%20Colombia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bartels, G. (1984). Los pisos morfoclimáticos de la Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia). En T. Van der Hammen y P. Ruiz (Eds.), *La Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia). Transecto Buritaca-La Cumbre*. Estudios de Ecosistemas Tropandinos 2 (pp. 99-130). J. Cramer.
- Bugge, M. M., Hansen, T. y Klitkou, A. (2016). What is the Bioeconomy? A Review of the Literature. *Sustainability*, 8(7), 691. <https://doi.org/10.3390/su8070691>
- Cantú-Martínez, P. C. (2017). Economía del conocimiento para la sostenibilidad. *Revista Economía y Sociedad*, 22(51), 1-13. <https://doi.org/10.15359/eyes.22-51.5>
- Cerón, V., Fernández, G., Figueroa, A. y Restrepo, I. (2019). El enfoque de sistemas socioecológicos en las ciencias ambientales. *Investigación y Desarrollo*, 27(2), 85-109.
- CIOH (2020, 7 de octubre). Santa Marta: Sistemas Atmosféricos Influyentes. https://cioh.dimar.mil.co/images/site/principales_puertos/pdf/5_SANTA_MARTA.pdf
- Comité Departamental de Cafeteros del Magdalena. (2019). *El Comité de Cafeteros del Magdalena y su razón de ser [Presentación en PowerPoint]*.
- Cortés, A. (1975). *Estudio semidetallado de suelos del parque «Tayrona»*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Cortés, A. (1982). *Geografía de los suelos de Colombia*. Editorial Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Cruz-O'Byrne, R., Casallas-Useche, C., Piraneque-Gambasica, N. y Aguirre-Forero, S. (2021). Knowledge Landscape of Starter Cultures: A Bibliometric and Patentometric Study. *Recent Patents on Biotechnology*, 15(3), 232-246.
- De Groot, R., Wilson, M. y Boumans, R. (2002). A typology for the classification description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393-408.
- Echevarría, S. G. (2002). El conocimiento, base del desarrollo de la persona y de la empresa. *Revista Empresa y Humanismo*, 5(2), 307-319.
- Forero, Y., Niño, N., Rodríguez, S., Rodríguez, N. y Morales, G. (2011). *Estudio exploratorio «Cultura alimentaria de la población indígena de la Sierra Nevada de Santa Marta»*.
- GBS. (2015). *Communiqué Global Bioeconomy Summit 2015. Making Bioeconomy Work for Sustainable Development*. https://gbs2020.net/wp-content/uploads/2021/10/Communique_final_neu.pdf
- GBS. (2018). *Comunicado de la Cumbre Global de Bioeconomía 2018*. https://gbs2020.net/wp-content/uploads/2021/10/Communique%CC%81GBS2018_final_Spanish.pdf
- Giraldo, N. (2010). Camino en espiral. Territorio sagrado y autoridades tradicionales en la comunidad indígena iku de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Revista Pueblos y Fronteras Digital*, 5(9), 180-222. <https://doi.org/10.22201/cimsur.18704115e.2010.9.164>

- Gobernación del Magdalena. (2013). *Plan estratégico departamental de ciencia, tecnología e innovación del Magdalena – PEDCTI 2013-2023*. <https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/paginas/pedcti-magdalena.pdf>
- Gutiérrez, N. (2016). *Distribución y ocupación del espacio. Las estructuras de los asentamientos en el área cultural tairona y su relación con el medio natural*. En B. Carrera y Z. Ruiz (Eds.), *Abya Yala Wawgeykuna. Arte, saberes y vivencias de indígenas americanos* (pp. 198-219). Enredars. <https://www.upo.es/investiga/enredars/wp-content/uploads/2017/03/12.Nayibe-Guti%C3%A9rrez-Montoya.pdf>
- Himes-Cornell, A., Pendleton, L. y Perla, A. (2018). *Valuing ecosystem services from blue forests: A systematic review of the valuation of salt marshes, sea grass beds and mangrove forests*. *Ecosystem Services*, 30(Part A), 36-48.
- Hodson, E. (2018). *Bioeconomía: el futuro sostenible*. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42(164), 188-201.
- Hodson, E., Henry, G. y Trigo, E. (2019). *La bioeconomía. Nuevo marco para el crecimiento sostenible en América Latina*. Editorial Pontificia Universidad Javeriana. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/8366/BVE190403022e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- IDEAM. (s. f.). *Ecosistemas*. Consultado el 24 de agosto de 2023. <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/ecosistemas1>
- Inderena y Sánchez, H. (1990). *Nuevos Parques Nacionales: Colombia*. Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Medio Ambiente.
- Iturralde, C. (2019). *Los paradigmas del desarrollo y su evolución: Del enfoque económico al multidisciplinario*. *RETOS. Revista de Ciencias de la Administración y Economía*, 9(17), 7-23.
- Le Saout, S., Hoffmann, M., Shi, Y., Hughes, A., Bernard, C., Brooks, T. M., Bertzky, B., Butchart, S. H. M., Stuart, S. N., Badman, T. y Rodrigues, A. S. (2013). *Protected Areas and Effective Biodiversity Conservation*. *Science*, 342(6160), 803-805. <http://www.lerf.eco.br/img/publicacoes/Science-2013-AreasProtegidasMundo.pdf>
- Minambiente. (2018, 19 de marzo). *Sierra Nevada de Santa Marta cuenta con nueva figura de protección*. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/3685-sierra-nevada-de-santa-marta-cuenta-con-nueva-figura-de-proteccion>
- Minciencias. (2016). *Colombia, el segundo país más biodiverso del mundo*. https://minciencias.gov.co/sala_de_prensa/colombia-el-segundo-pais-mas-biodiverso-del-mundo
- OCDE. (2012, marzo). *Perspectivas ambientales de la OCDE hacia 2050*. <https://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/49884278.pdf>
- Ojeda, D. (2012). *Green pretexts: Ecotourism, neoliberal conservation and land grabbing in Tayrona National Natural Park, Colombia*. *Journal of Peasant Studies*, 2(39), 357-375.
- ProSierra. (1991). *Historia y Geografía, Sierra Nevada de Santa Marta*. Fondo Editorial ProSierra Nevada de Santa Marta.
- Ramírez, C. D. (2019). *Política y gestión de la ciencia, la tecnología y la innovación: Una perspectiva desde América Latina y el Caribe. El caso de los programas de estímulo en Venezuela*. *Revista Electrónica Entrevista Académica (REEA)*, 1(3), 115-135. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7815639>

- Rangel, J. O. y Garzón, A. (1995). *Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia)*. En J. O. Rangel-Ch. (Ed.), *Colombia diversidad biótica*. Vol. I (pp. 155-170). Instituto de Ciencias Naturales.
- Robert, M. (2015). *Desigualdad e inclusión social en las Américas: elementos clave, tendencias recientes y caminos hacia el futuro*. *Desigualdad e Inclusión Social en las Américas*, 14, 35-54.
- Rodríguez, G. A. y Mora, A. (2010). *Conflictos y judicialización de la política en la Sierra Nevada de Santa Marta*. Editorial Universidad del Rosario.
- Rodríguez, A. G., Rodrigues, M. D. S. y Sotomayor, O. (2019). *Hacia una bioeconomía sostenible en América Latina y el Caribe: elementos para una visión regional (Serie Recursos Naturales y Desarrollo 191)*. Cepal. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44640/4/S1900161_es.pdf
- Serna, D. J., Tamaris-Turizo, C. E. y Gutiérrez Moreno, L. C. (2015). *Distribución espacial y temporal de larvas de Trichoptera (Insecta) en el río Manzanares, Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia)*. *Revista de Biología Tropical*, 63(2), 465-477.
- Sevink, J. (1984). *An altitudinal sequence of soils in the Sierra Nevada de Santa Marta*. En T. Van der Hammen y P. Ruiz (Eds.), *La Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia), Transecto Buritaca-La Cumbre. Estudios de ecosistemas tropandinos* (pp. 131-138). J. Cramer.
- Trillos, M. (1995). *Multilingüismo en la Sierra Nevada de Santa Marta*. *Thesaurus: Boletín del Instituto Caro y Cuervo*, 50(1-3), 293-306.
- Ulloa, A. (2004). *La construcción del nativo ecológico: Complejidades, paradojas y dilemas de la relación entre los movimientos indígenas y el ambientalismo en Colombia*. Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH).
- Van der Hammen, T. (1984). *Datos eco-climatológicos del Transecto Buritaca-La Cumbre*. En T. Van der Hammen y P. Ruiz (Eds.), *La Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia), Transecto Buritaca-La Cumbre. Estudios de ecosistemas tropandinos* (pp. 189-202). J. Cramer.
- Viloria, J. (2005). *Sierra Nevada de Santa Marta: economía de sus recursos naturales (Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana 61)*.
- Viloria, J. (2019). *Aroma de café: economía y empresas cafeteras en la Sierra Nevada de Santa Marta*. *Jangwa Pana*, 18(2), 163-181.

**VALIDACIÓN DE LA COSECHA ASISTIDA DE CAFÉ
EN CUATRO MUNICIPIOS PRODUCTORES DEL
DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA: TECNOLOGÍA
CLAVE DEL DESARROLLO SOSTENIBLE**



Validación de la cosecha asistida de café en los municipios productores del departamento del Magdalena: tecnología clave del desarrollo sostenible



Preámbulo

El uso de tecnología hace que los costos de producción en los cultivos se reduzcan y generen menos ganancias para los productores agropecuarios. Por lo tanto, cuando la producción es de subsistencia, es decir, con bajos rendimientos, existe menos dinero disponible para cubrir gastos de primera necesidad como alimentación, salud, recreación y educación. Esto hace que los caficultores que dependen del cultivo se vean cada vez más endeudados u obligados a dejar sus parcelas, cambiar de cultivo o incluso ingresar a la producción de cultivos ilícitos.

En Colombia, la industria cafetera se encuentra en continua expansión dadas las características de alta calidad del grano y el proceso llevado a cabo en las unidades productivas; pero existen barreras que ponen en riesgo la sostenibilidad del sector. Entre estos factores

se encuentran la baja disponibilidad de mano de obra para las labores de cosecha y la cada vez más creciente realidad de productores con edades avanzadas debido a la migración de los jóvenes a las ciudades.

El departamento del Magdalena no escapa a la anterior realidad, que se recrudeció con la pandemia generada por el COVID-19 dadas las circunstancias de aislamiento. Esta situación impidió que recolectores de café se trasladaran desde el interior del país, de manera que la eficiencia en el proceso de cosecha se vio seriamente afectada. Estas condiciones han generado incertidumbre debido a la baja tecnificación del cultivo de café en la SNSM.

Entre los desafíos existentes para la producción de café en la SNSM se encuentra la carencia de tecnologías o la falta de uso de tecnologías emergentes que puedan reducir el riesgo, mejorar los procesos de cosecha e incrementar los rendimientos de los cultivadores del grano. Por una parte, no es de extrañar que el ingreso de la tecnología puede ayudar a reducir costos de producción vía agilidad en la cosecha, pero también en la reducción de plagas y enfermedades; sin embargo, también es cierto, por otra parte, que el empleo de la tecnología requiere inversiones que no están al alcance de pequeños productores y que pueden acarrear consecuencias sociales y económicas adversas.

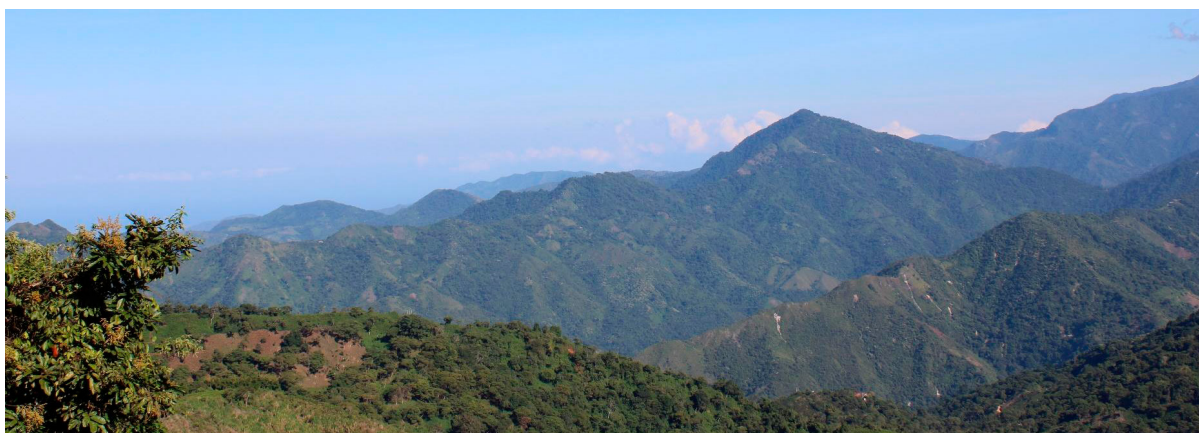
La caficultura del Magdalena se desarrolla en 17.946 ha, en cuatro municipios ubicados en las estribaciones de la SNSM: Santa Marta, Ciénaga, Fundación y Aracataca. Esta actividad es el sustento de 4.941 familias cafeteras y 5.151 fincas. Se trata, en general, de pequeños productores, pues el 84 % de tienen cafetales inferiores a las 5 ha, con un tamaño promedio de 2,0 ha. Asimismo, del total de hectáreas de café sembradas en el departamento, el 73 % (13.048 ha) corresponden a café tecnificado joven; el 22 % (3.983 ha), a café envejecido, y el 5 % (870 ha), a café tradicional. Al respecto, es necesario anotar que 93 % de la caficultura del Magdalena se encuentra sembrada en sistemas agroforestales.

Las principales variedades de café que predominan en el Magdalena son Colombia, Castillo y Tabi, las cuales son resistentes a la roya y representan un 70 % de participación en el área total sembrada, es decir, 12.507 ha (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [Minagricultura], 2021). Por otra parte, el 30 % (5.504 ha) corresponden a la variedad Caturra, susceptible a dicha plaga.

En Colombia, y en especial en la zona cafetera de la SNSM, la técnica de recolección más empleada es la manual selectiva, esto es, el desgrane en forma individual de los granos maduros (Oliveros-Tascón y Sanz-Urbe, 2011), debido, entre otros factores, a la pronunciada inclinación de los terrenos y las dificultades en la penetración. Esta tendencia da lugar al pago más elevado de la mano de obra, lo que es un incentivo para trabajadores provenientes del interior del país. Así, la cosecha es la actividad con mayor participación en la estructura de costos de producción de café en Colombia (Sanz-Urbe *et al.*, 2018), ubicándose entre el 40 % y el 50 % de dichos gastos y siendo uno de los factores determinantes de la calidad del producto.

Lo anterior, no obstante, sugiere un alto uso de una mano de obra que se prevé sea cada vez más escasa (según el Comité Departamental de Cafeteros, en el Magdalena, 49,1 % de la mano de obra es propia y el 50,9 % proviene de otros lugares del país y de Venezuela).

A su vez, el hecho de que la cosecha se lleve a cabo de forma manual da lugar a la posibilidad de una considerable caída de frutos al suelo que pueden tornarse en foco de plagas de importancia económica como la broca del café. Este problema, por ejemplo, se hizo mucho más evidente durante el periodo de confinamiento y reducción de la movilidad a raíz de la pandemia por COVID-19, cuando no hubo traslado de mano de obra para la recolección del grano y, por lo tanto, se generó un desperdicio que significó pérdidas para los agricultores. Por esta razón la rentabilidad de la caficultura colombiana es inferior a la de los países productores de la región.



En otros países, como Brasil, la utilización de equipos como las cosechadoras portátiles ha permitido incrementos en el rendimiento de 300 % y una reducción de los costos unitarios de 27 % en cafetales de alta densidad y con terrenos de pendiente moderada a fuerte (20-50 %). De igual modo se ha podido realizar un control cultural de la broca, ya que todos los frutos son retirados del campo, reduciendo por tanto la presión del insecto. Esta tecnología, de hecho, ya se ha probado en el interior de Colombia con algún éxito, pero aún no se ha implementado en los cafetales propios de la SNSM, donde la producción, a diferencia del centro del país, se concentra en los últimos meses del año y, por tanto, todos los frutos presentan el mismo grado de maduración. Esto es, no se tienen flores, frutos verdes y frutos maduros al tiempo, como ocurre en la zona central cafetera, por lo que deben ser separados para no afectar la calidad final del grano. Por lo tanto, se espera un menor número de pases, dado que se dan entre dos y tres eventos de floración al año, mientras que en el interior del país estos pueden llegar a ser hasta veinte.

Por lo mencionado, y con el fin de validar y estimar el nivel de adopción tecnológica en los cultivos de café del departamento, la Universidad del Magdalena, junto con la Federación Nacional de Cafeteros —en concreto, el Comité Departamental de Cafeteros de Magdalena, La Guajira y Cesar—, implementó un proyecto de cosecha asistida de café en cuatro municipios productores de este grano como aspecto clave del desarrollo sostenible. A través de esta iniciativa se verificó la conveniencia del empleo de las derribadoras selectivas de café como innovación tecnológica y el uso de lonas para medir el rendimiento de la

cosecha y la calidad del producto final como alternativas frente a la reducción de mano de obra en la zona y la emigración a las ciudades desde las zonas productoras.

Resumen

A pesar de que la pandemia ya pasó, la caficultura en el departamento del Magdalena sigue enfrentando baja disponibilidad de mano de obra. Esto se debe a diversos factores; entre ellos, las dificultades persistentes en el traslado de recolectores desde otras regiones del país, la migración de los jóvenes a las ciudades y la complejidad en el acceso a áreas productivas. Esta situación provoca incertidumbre con respecto a la recolección de la cosecha. Además, el método manual continúa generando un aumento significativo en los costos de producción.

Una alternativa tecnológica que ha sido explorada en otras regiones de Suramérica y de Colombia (donde el Centro Nacional de Investigaciones de Café [Cenicafé] ha comprobado sus bondades) es el uso de derribadoras selectivas de café. Estos dispositivos, que se emplean en el momento de mayor concentración de frutos maduros en la cosecha, requieren la retención de pases y la utilización de lonas para incrementar la eficiencia en el proceso.

Innocafé nace entonces de la necesidad de impartir a los caficultores del Magdalena la adopción de tecnologías aliadas al proceso de recolección que garanticen reducción de costos de producción y la adaptación al cambio climático. De este modo se propone una respuesta no solo a la baja disponibilidad de mano de obra, sino a las mismas ventajas geográficas y climáticas con las que cuentan los cultivos de la SNSM por ser sistemas de producción bajo sombrero, con concentración de la cosecha entre septiembre y febrero, que generan cerezas de gran tamaño, con granos de mayor peso, gracias a las precipitaciones que se presentan entre la floración y la maduración de frutos, condiciones ideales para el uso de la tecnología de «cosecha asistida».

En este orden de ideas, el proyecto aquí descrito validó el uso de lonas para la cosecha manual del café y el manejo de la derribadora selectiva de café DSC-18, complementadas con la prolongación del tiempo entre pases de cosecha en cuatro zonas productoras de café del departamento del Magdalena (Santa Marta, Ciénaga, Aracataca y Fundación) durante la cosecha de 2021. Para ese fin, se llevaron a cabo ensayos de recolección en cuarenta fincas cafeteras, donde se determinó el desempeño de estas alternativas frente a la técnica tradicional de recolección con coco. Se midieron la masa de café cosechada, el porcentaje de frutos verdes, pintones, maduros, sobremaduros y secos recolectados, el rendimiento de los operarios (kg/h) y las pérdidas (frutos dejados en los árboles).

Según los resultados, el uso de lonas (10,79 kg/árbol) mostró los mayores promedios de masa cosechada, seguido por la utilización de coco y de la derribadora. Así mismo se evidenció una mayor recolección de frutos maduros (51,96 %), sobremaduros y secos, y una menor de frutos verdes (25,42 %) y pintones (14,16 %). La técnica convencional con coco reflejó mayor cantidad de frutos verdes (27,53 %) en la masa cosechada, mientras que los

pintones y maduros presentaron porcentaje similar a la recolección con lonas, con 14,16 % y 51,96 %, respectivamente.

El rendimiento obtenido fue menor con el uso de la derribadora (2 kg/h/operario), mientras que la recolección manual con lonas mostró el mayor registro en este sentido (9,63 kg/h/operario). Respecto a las pérdidas, la derribadora tuvo menor cantidad promedio de frutos dejados en el suelo, con valores inferiores a cinco; en cambio, para la recolección manual con coco se detectaron en promedio once frutos dejados en el suelo.

En la zona productora del departamento del Magdalena la cosecha asistida presenta aspectos novedosos y prometedores, así como una amplia gama de aplicaciones y beneficios prácticos. La cosecha manual con lona representa un enfoque innovador y se constituye como la mejor alternativa para la recolección del café al traducirse en mayor agilidad y, por tanto, eficiencia de la cosecha con reducción en la mano de obra. Así, la cosecha recogida en menor tiempo por esta vía, con mayores producción y calidad, permite a los cafeteros obtener mayor rentabilidad. Por su parte, la derribadora selectiva es una opción que se debe seguir explorando para lograr mayor eficiencia en su uso y adopción.

Palabras clave: café, cosecha asistida, cosechadora manual, Sierra Nevada de Santa Marta, tecnología, derribadora selectiva de café.

Abstract

Despite the pandemic being over, coffee farming in the Magdalena department continues to face a low availability of labor. This is caused by various factors, including persistent challenges in transporting harvesters from other regions of the country, the migration of young people to cities, and existing difficulties in accessing productive areas. This situation leads to uncertainty regarding the crop harvesting. Additionally, manual harvesting raises production costs.

A technological alternative that has been used in other regions of South America and Colombia is a selective coffee shaker. These machines are used in times of the most significant ripe fruit concentration at harvest, so the retention of passes and tarps is essential for greater efficiency. CENICAFÉ has successfully evaluated this technology in other regions of Colombia.

Innocafé was born from the need to teach Magdalena's coffee growers the use of technologies associated with the coffee cherry harvesting process that guarantees production costs reduction and climate change adaptation in response to the low availability of labor and the geographical and climatic advantages as a shady production system with harvest concentration between September and February, by the rainfall that occurs between flowering and fruit ripening. Large cherries are generated with heavier grains, conditions ideal for «assisted harvest» technology.

For this reason, the present project validated the plastic tarps used for manual coffee harvesting and the selective coffee shaker DSC-18, complemented with the extension time between harvest passes in four coffee-producing areas of Magdalena's department

(Santa Marta, Ciénaga, Aracataca, and Fundación). During 2021 through harvesting trials in 40 coffee farms, the plastic tarps used for manual harvesting and the handling's shaker performance with coconut use (traditional technique) were compared. Harvested coffee mass, percentage of green, black, ripe, over-ripe, and dry fruits collected, operator performance (kg/h), and losses (fruits left on the trees) were measured.

The results allowed us to determine that plastic tarps use showed the highest harvested mass averages (10,79 kg/tree) followed by shaker and coconut use and evidenced a more significant collection of cherry fruits (51,96%), raisin and dry fruits, as well as less green (25,42%) and unripe green fruits (14,16%). The conventional technique with coconut showed a more considerable number of green fruits (27,53%) in the harvested mass. In comparison, the green yellow and cherry ones presented a similar percentage to the collection with canvases, with 14,16% and 51,96%, respectively.

The yield obtained was lower with the machine's use (2 kg/h/operator), while manual collection with plastic tarps showed the highest product (9,63 kg/h/operator); regarding losses, the shaker showed a lower average of fruits left above the soil with values less than five compared to manual harvesting with coffee pickers that showed an average of 11 fruits left above the soil.

In the coffee-producing region of the Magdalena department, assisted harvesting presents innovative and promising aspects, as well as a wide range of applications and practical benefits. Manual harvest with plastic tarps represents an innovative approach and is considered the best alternative for coffee harvesting, resulting in increased agility and, therefore, improved harvest efficiency with reduced labor. On the other hand, a harvest collected in a shorter time with higher production and better quality enables coffee farmers to achieve greater profitability. Furthermore, the use of selective coffee shaker is a task that requires continued work to achieve higher efficiency in their use and greater adoption.

Keywords: coffee, assisted harvest, manual harvester, Sierra Nevada de Santa Marta, technology, selective coffee shaker.



Fundamentación

Café en el mundo

El café es uno de los productos más comercializados en los mercados internacionales y una de las bebidas más apetecidas y consumidas (Cruz-O'Byrne *et al.*, 2021; Elhalis *et al.*, 2020). Entre 2018 y 2019 se produjeron más de 165 millones de sacos de café de 60 kg (International Coffee Organization [ICO], 2020), y el tamaño del mercado de exportación de este grano se estima en USD 200.000 millones anuales. Los pequeños productores de café son responsables del 70 % de la producción mundial, y se calcula que 25 millones de productores dependen directamente del café para su sustento (Borrella *et al.*, 2015; Dietz *et al.*, 2020).

Café en Colombia

Colombia, junto con Brasil, Etiopía, Honduras y Perú, son los mayores productores de la especie *Coffea arabica* (ICO, 2020). En el país, para 2021 se reportaron 844.744 ha de café sembradas en 604 municipios, representados por 654.227 fincas, de las cuales el 96 % son menores a 5 ha. Este cultivo genera alrededor de 960.000 trabajos directos, contribuyendo al 25 % del empleo agropecuario. La producción para 2020 llegó a 13,9 millones de sacos, gracias a las innovaciones tecnológicas impulsadas por la Federación Nacional de Cafeteros (Minagricultura, 2021).

Café en el departamento del Magdalena

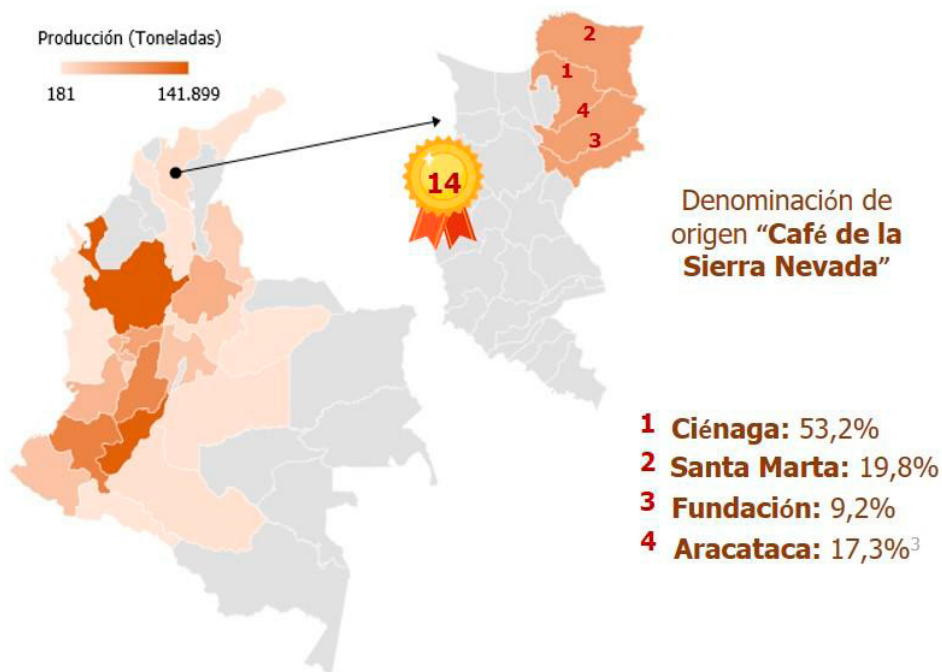
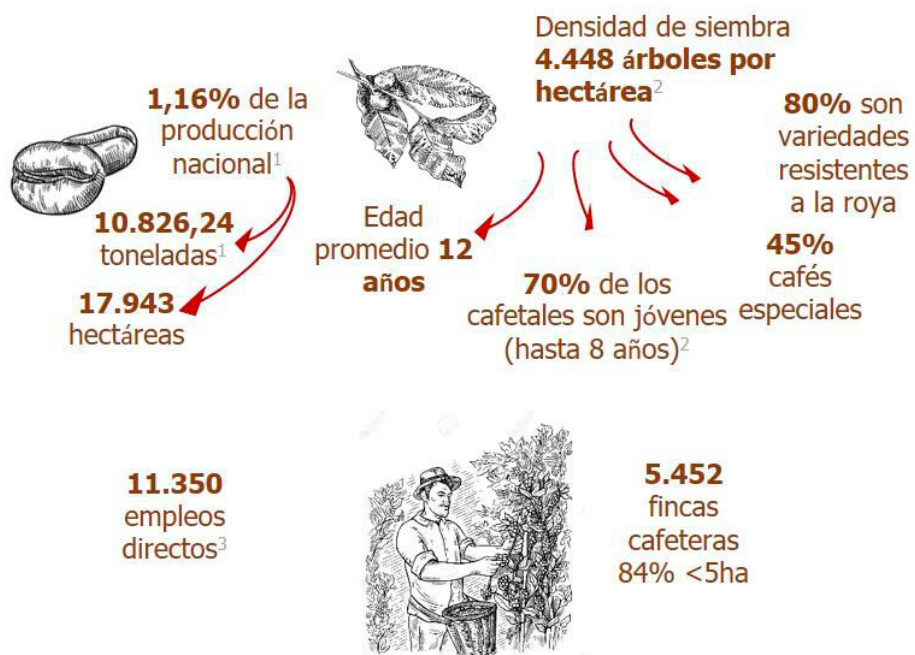
Como se aprecia en la Figura 7, la industria cafetera es vital para el desarrollo económico y social del departamento del Magdalena. Además de contribuir a la producción nacional, su importancia radica en el número de personas que dependen de esta actividad (5.042 familias y 11.350 empleos directos) en los municipios de Ciénaga, que es el de mayor área sembrada (53,2 %), Santa Marta (19,8 %), Fundación (9,2 %) y Aracataca (17,3 %) (Piraneque *et al.*, 2022).

Además de lo anterior, la producción cafetera está impulsada por asociaciones y cooperativas con importancia significativa para la economía de la región. Esta producción en el departamento del Magdalena busca la sostenibilidad, así como la consecución de cafés especiales con altos estándares de calidad (Sott *et al.*, 2020), lo que depende de las técnicas y tecnologías empleadas en el cultivo, la cosecha y el procesamiento (Dietz *et al.*, 2020).

Variedad de café Castillo

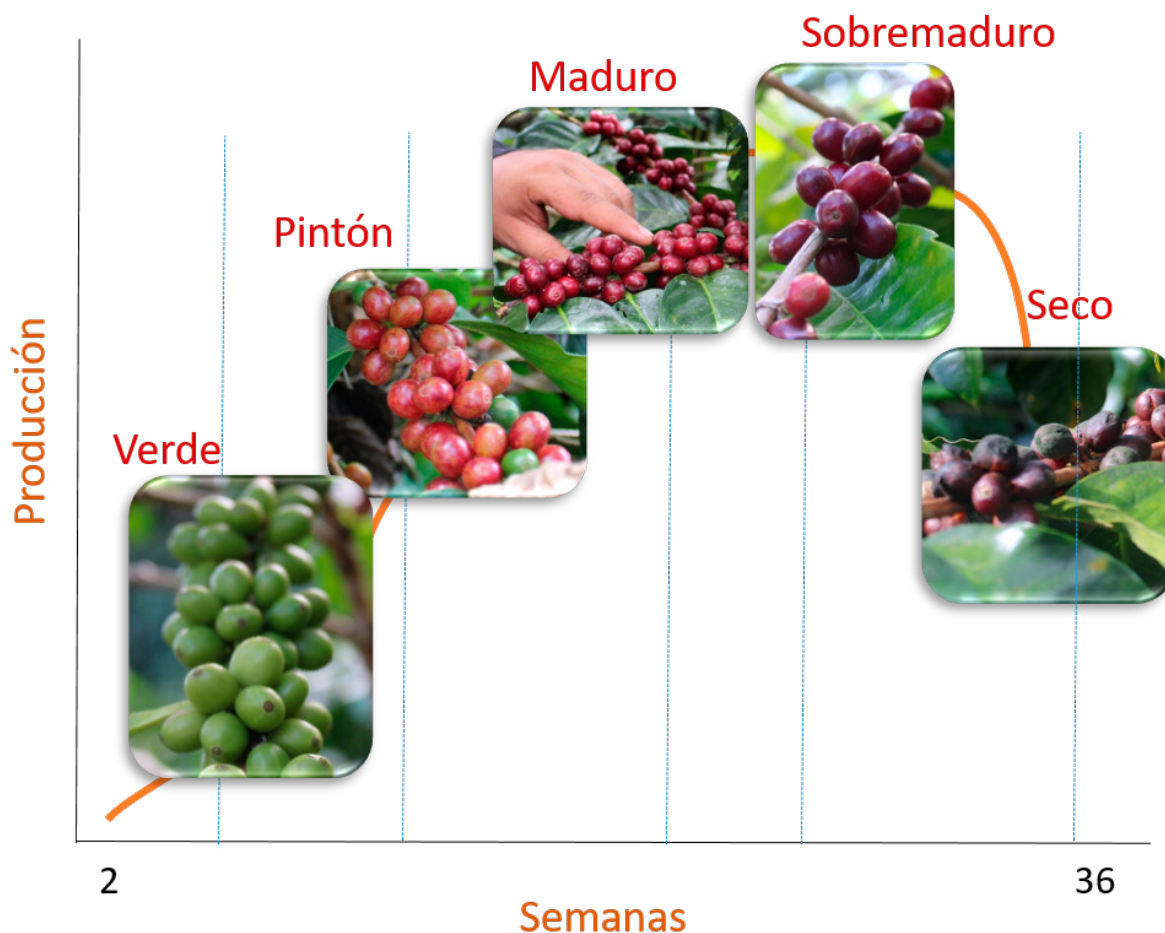
El Castillo es una variedad de café que, por su diversidad genética, resulta resistente a la roya (Figura 8), por lo que su cultivo se ha expandido en todas las zonas cafeteras de Colombia. Asimismo, es de excelente producción por su tolerancia a enfermedades y mayor tamaño del grano (Ramírez *et al.*, 2013).

Figura 7. Datos relevantes del sector productivo cafetero en el departamento del Magdalena (SNSM)



Fuente: elaboración propia con base en Piraneque *et al.* (2022).

Figura 8. Proceso de desarrollo del fruto de café cultivar Castillo en la SNSM



Recolección de café

Distribución de la cosecha.

En las estribaciones de la SNSM se tiene una época de cosecha concentrada entre los meses de octubre a enero. En otras zonas del país la cosecha cambia según las condiciones agroecológicas, con una cosecha principal en el primer semestre, y la mitaca, en el segundo (Ramírez *et al.*, 2013).

Método tradicional de recolección manual de café.

Se asigna un área a un grupo de recolectores, quienes siguen un patrón de corte en forma ordenada, con trayectos demarcados por un banderín. El tiempo de recolección depende de la habilidad del operario, la variedad de café, el número de plantas por unidad de área, la altura del árbol, el estado de maduración de los frutos, entre otras variables. Para

vaciar el recipiente o «coco» (Foto 1), es necesario retirar residuos presentes para empaclar y pesarlos (Ramírez *et al.*, 2013).

Foto 1. Método tradicional de recolección de café en la SNSM



Fuente: Nelson Piraneque.

Retención de pases de cosecha.

El departamento del Magdalena tiene una producción promedio de 14.000.000 kg de café pergamino seco. Cabe anotar que las condiciones climáticas de este territorio conforman un periodo seco (diciembre-abril), lo cual conlleva a concentrar la cosecha de café.

En una investigación con miras a aumentar el rendimiento de los recolectores, optimizar la mano de obra en las fincas y posiblemente reducir costos, Cenicafé realizó observaciones en diferentes regiones, prolongando la espera entre pases de cosecha para mejorar la oferta de frutos maduros en los árboles (Sanz *et al.*, 2018). De esta forma se halló que se podía esperar entre 30 y 35 días sin que se presentaran problemas de calidad, aumento de café brocado, pérdida de frutos al suelo o aparición de muchos frutos secos en el árbol. Este es, de hecho, un aspecto que puede mejorarse en la región norte, debido a la concentración de la cosecha, con máximo dos eventos de floración.

Cosecha de café asistida con máquinas.

En la última década se ha incrementado el avance tecnológico asociado al cultivo de café (Cruz-O'Byrne *et al.*, 2020). La semimecanización de la cosecha de este grano consiste en asistir el proceso con máquinas portátiles motorizadas para realizar el desprendimiento de los frutos de la manera más selectiva posible (Oliveros-Tascón y Sanz-Uribe, 2011; Oliveros

et al., 2013). La mayoría de las máquinas que han sido evaluadas en Colombia están acompañadas de lonas dispuestas en el suelo para recibir los frutos que son desprendidos, lo que demanda una familiarización de los operarios no solamente con las máquinas, sino también con la extensión y recogida de dichas telas (Santinato *et al.*, 2019).

El desarrollo de investigación en cosecha se ha basado principalmente en tres aspectos: desarrollos propios, máquinas para cosecha semimecanizada de otros productos agrícolas y máquinas para cosecha semimecanizada de café. En tiempos recientes se ha realizado un trabajo conjunto entre la empresa brasileña Brudden y Cenicafé con el fin de desarrollar una máquina para las condiciones colombianas (Noticias Caracol, 2019). El trabajo resultó en la máquina Brudden DSC-18 (Foto 2), la cual presenta ventajas considerables de selectividad y rendimiento con respecto a las máquinas que han sido evaluadas previamente.

El equipo Brudden DSC-18 trabaja con un motor de combustión interna como fuente de energía. Este equipo tiene una horquilla golpeadora que ejerce vibración a altas frecuencias y bajas amplitudes, causando la caída de frutos por colapso de la estructura fruto-pedúnculo por fatiga. Los cosecheros que han usado la máquina en lotes con pases de cosecha esperados de 35 días han presentado un rendimiento 100 % mayor que el que obtienen recolectores con el sistema tradicional con coco. Asimismo, los cosecheros experimentaron una curva de aprendizaje, en la que obtienen contenidos de frutos de café verdes en rangos aceptables para cosecha con máquina ($v < 8 \%$).

Foto 2. Cosecha asistida de café empleando derribadora Brudden DSC-18 en la SNSM



Fuente: Nelson Piraneque.



Estado del arte

Una de las condiciones que dificultan la recolección de café son las altas pendientes. En atención a esta particularidad, Vélez *et al.* (1999) estudiaron tiempos y movimientos de la recolección manual del café en cinco fincas con pendientes superiores a 75 % en la zona central cafetera de Colombia, donde observaron la dinámica de 24 operarios y caracterizaron los movimientos en lote, surco, ramas y manos. Los investigadores establecieron diferencias entre fincas respecto al tiempo empleado para las actividades operativas y detectaron que durante el desprendimiento de las cerezas hay dos secuencias asociadas a la altura. Así, identificaron ciclos de desprendimiento con cinco y seis movimientos para esta actividad y 15 posturas de los recolectores durante la recolección, información importante para posteriores estudios de mayor eficiencia en la labor de cosecha.

Asimismo, en proyectos para el diseño y evaluación de herramientas para la cosecha manual de café, se evaluó una herramienta denominada RASELCA-II. En este caso, «se realizaron cuatro evaluaciones con el dispositivo, cada una con 10 operarios, asignando a cada operario una parcela de 200 árboles dividida en dos subparcelas iguales, para cosechar con la herramienta y con el método tradicional» (Oliveros-Tascón *et al.*, 2005, p. 43). Los resultados indican que el RASELCA-II es un dispositivo promisorio para asistir la cosecha manual del café porque incrementa el rendimiento por operario hasta 117,4 %, con 6,0 % de frutos inmaduros en la masa cosechada y desprendimiento del 45,1 % de los frutos en madurez de cosecha.

También se ha evaluado un desgranador mecánico portátil para la cosecha del café-descafé. Los primeros modelos de este dispositivo, que emplearon motor de combustión interna, aumentaron tres veces el rendimiento operativo respecto a cosecha manual (Ramírez-Gómez *et al.*, 2006). De igual forma, en el marco del proyecto «Contribución de los

componentes del método mejorado de cosecha en el desempeño operativo de los recolectores de café», se evaluó el desempeño de los operarios aplicando 17 tratamientos con diseño de bloques completos al azar (López Díaz *et al.*, 2007). En este caso, los resultados mostraron que, «en las condiciones del experimento, ninguno de los componentes del método mejorado había influido en los indicadores del proceso de recolección» (López-Díaz *et al.*, 2007, p. 187).

Posteriormente, Castañeda *et al.* (2014) analizaron un método para la recolección de café variedad Colombia en terrenos de alta pendiente, utilizando los resultados obtenidos por Vélez *et al.* (1999) para capacitar a los operarios. Los autores, sin embargo, verificaron que no se habían mejorado los indicadores de eficiencia en la recolección.

Como se aprecia, la tecnología que se pretende implementar se encuentra en un nivel de desarrollo medio, pues ya ha sido validada en ambientes relevantes. Este texto, en particular, expone los resultados obtenidos a partir de la experiencia del uso de lonas para la cosecha manual del café y manejo de la derribadora selectiva de café DSC-18, complementadas con la prolongación del tiempo entre pases de cosecha, en cuatro zonas productoras de café del departamento del Magdalena (Santa Marta, Ciénaga, Aracataca y Fundación) durante la cosecha de 2021.

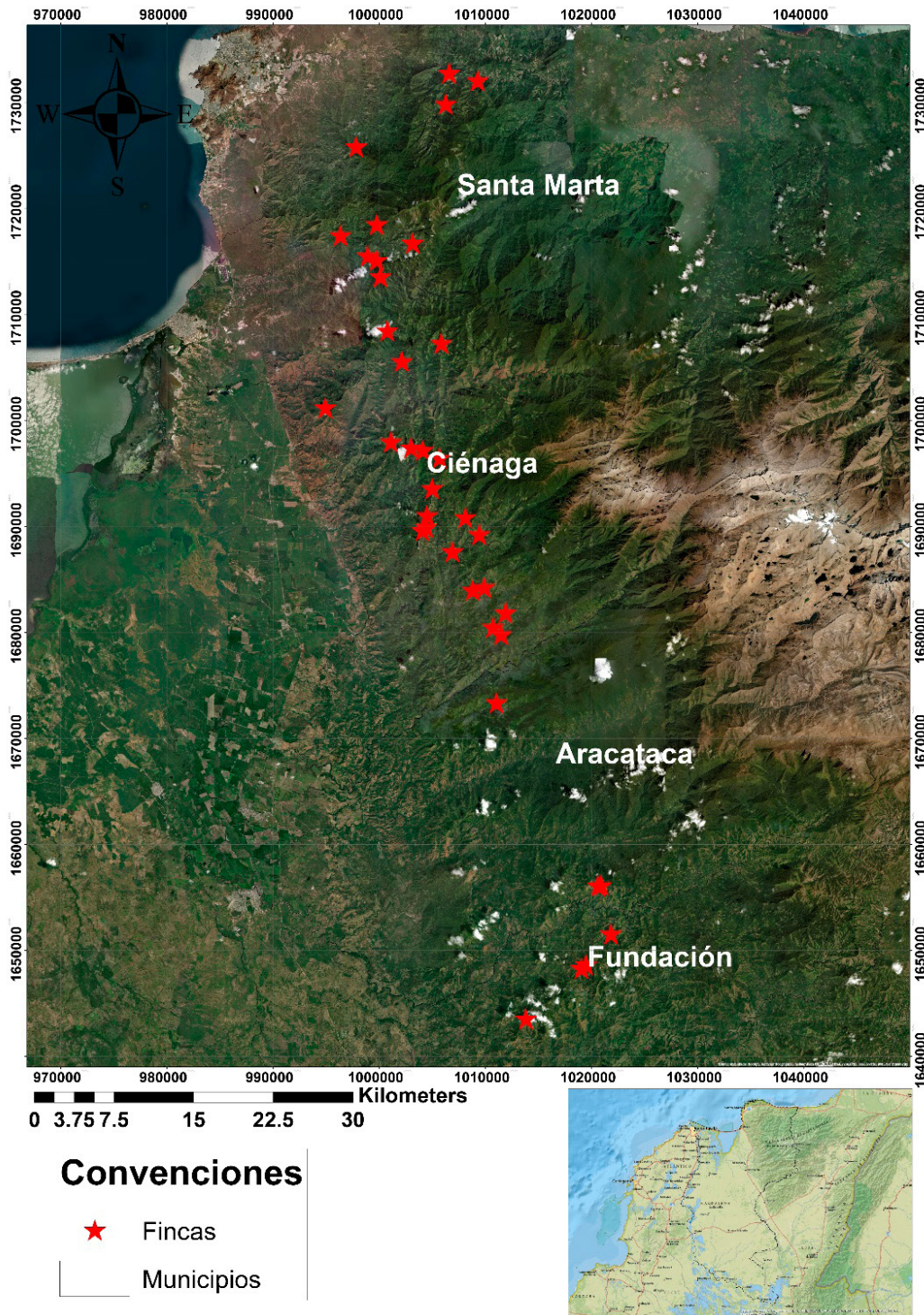


Materiales y métodos

Área de trabajo

Las validaciones en el marco del proyecto descrito se realizaron en 40 fincas de cada uno de los municipios cafeteros seleccionados dentro del departamento del Magdalena: Aracataca, Ciénaga, Fundación y Santa Marta (Figura 9).

Figura 9. Ubicación de las fincas cafeteras en los municipios de Santa Marta, Ciénaga, Aracataca y Fundación donde se validó la tecnología de cosecha asistida



Material vegetal

Los predios seleccionados para la evaluación cultivada contaron con la variedad Castillo (resistente a la roya) (Foto 3), con edades entre tres y cinco años desde su establecimiento. Se ubicaron predios cuya densidad de siembra fue superior a 4.500 árboles por hectárea.

Foto 3. Plantas de café listas para el proceso de recolección en la SNSM



Fuente: Nelson Piraneque.

Retención de pases

Desde el mes de marzo de 2021 se registró la floración de los cafetales (Foto 4), y con esta información se estimó la fecha de cosecha asistida prolongando el tiempo entre un pase de cosecha y otro, con el fin de tener la mayor cantidad de frutos maduros en el árbol según lo establecido por Rendón-Sáenz *et al.* (2008).

Foto 4. Producción del café. La retención de pases conlleva a tener mayor masa de fruto maduro en el árbol



Fuente: Nelson Piraneque.

Validación de lonas para la cosecha manual de café

Las lonas utilizadas son mallas con 70 % de sombreado de 3 x 12,5 m, hechas en fibra de polipropileno y con cierre Velcro® (Sanz-Uribe y Duque, 2020). Para validarlas, se dividió un lote de media hectárea sembrado en café en dos partes iguales (parcelas), y en cada una de ellas se realizaron todas las prácticas agronómicas sugeridas por Cenicafé.

En una de las parcelas, asignada aleatoriamente, se hizo la recolección manual tradicional con coco (testigo) (Foto 5). En la otra, la cosecha empezó por hacer los descuñes con recolección manual tradicional, mientras que el resto del proceso se llevó a cabo con lonas (Foto 6), prolongando los pases de cosecha de mayor producción entre 30 y 35 días con el fin de tener mayor disponibilidad de frutos maduros en los árboles.

Foto 5. Recolección manual de café con el método tradicional (coco)



Fuente: Nelson Piraneque.

Los operarios fueron entrenados en el manejo de las lonas. En ambos métodos, la recolección de descuñe se pagó al jornal y la recolección de los pases principales se pagó al kilo. De cada parcela se llevó el registro de los costos de recolección por cosecha (principal y mitaca) y, para lograr el objetivo de esta investigación, fue indispensable evaluar la recolección con lonas en comparación con el método tradicional. Es decir, la cosecha fue la unidad de muestreo, y las variables de interés fueron: número de operarios, número de jornales, masa de café cosechada por jornada, contenido de frutos verdes en la masa cosechada, frutos maduros dejados en los árboles y frutos en el suelo.

Foto 6. Cosecha de café asistida con lonas en la SNSM



Fuente: Nelson Piraneque.

Los tratamientos se aplicaron de la siguiente manera:

1. Se asignaron aleatoriamente los surcos por trabajar durante la jornada.
2. Se seleccionaron y marcaron aleatoriamente 60 árboles de los surcos elegidos para cada tratamiento. A estos se les removió el total de frutos que había en el suelo a su alrededor.
3. A cada uno de los operarios se les entregaron lonas o cocos según el tratamiento y estopas suficientes.
4. Los tratamientos fueron aplicados simultáneamente.
5. En los tratamientos con lonas, se tomó por separado la duración de las siguientes actividades: extensión de lonas, cosecha, recolección de lonas, separación de hojas y empaque.
6. Después de cada tratamiento se contaron los frutos dejados en cada uno de los árboles marcados, haciendo la distinción de cuántos eran cosechables (pintones, maduros, sobremaduros y secos) y cuántos estaban inmaduros. También se registraron los frutos que se encontraban en el suelo, alrededor y debajo de cada árbol marcado, distinguiendo también entre frutos cosechables y verdes.

7. De la masa de café recolectada por cada pareja, se tomó una muestra de 1,0 kg y se determinaron los contenidos de los frutos verdes, pintones, maduros, sobremaduros y secos (Foto 7).

Foto 7. Selección del número de frutos verdes, pintones, maduros, sobremaduros y secos de la masa cosechada



Fuente: Nelson Piraneque.

La variable de frutos verdes en masa cosechada es una medida complementaria que se calculó como indicador de calidad de la cosecha. Para obtenerla, se dividió la masa de los frutos verdes contenidos en la muestra tomada de la masa cosechada sobre la masa total de esta, es decir, sobre los 1.000 g. Asimismo, las variables de frutos cosechables dejados en el árbol y frutos en el suelo, asociadas a los indicadores de eficacia y de pérdidas, respectivamente, fueron también complementarias. Para conocer el valor de ellas, después de cada tratamiento se contaron los frutos cosechables que se habían dejado en los árboles marcados y los frutos que habían quedado en el suelo en los alrededores y debajo de cada árbol. Se tomó el promedio de estas dos variables expresado en frutos/sitio.

Validación de la derribadora selectiva de café Brudden DSC-18

La derribadora selectiva de café Brudden DSC-18 está conformada por tres partes, las cuales, junto con los principios físicos que la gobiernan, se encuentran descritas en Sanz-Uribe y Duque (2020) (Foto 8). En este caso también se tomó un lote de media hectárea sembrado de café en las fincas seleccionadas, dividido en dos parcelas en las que se realizaron todas las prácticas agronómicas sugeridas por Cenicafé (Figura 10).

En una de las parcelas, asignada aleatoriamente, se realizó la recolección manual tradicional (testigo), mientras que en la otra se combinó dicho método con el equipo Brudden, empezando por hacer los descuñes manualmente y siguiendo el resto de la cosecha con el equipo, prolongando los pases de mayor producción entre 30 y 35 días con el fin de tener mayor disponibilidad de frutos maduros en los árboles.

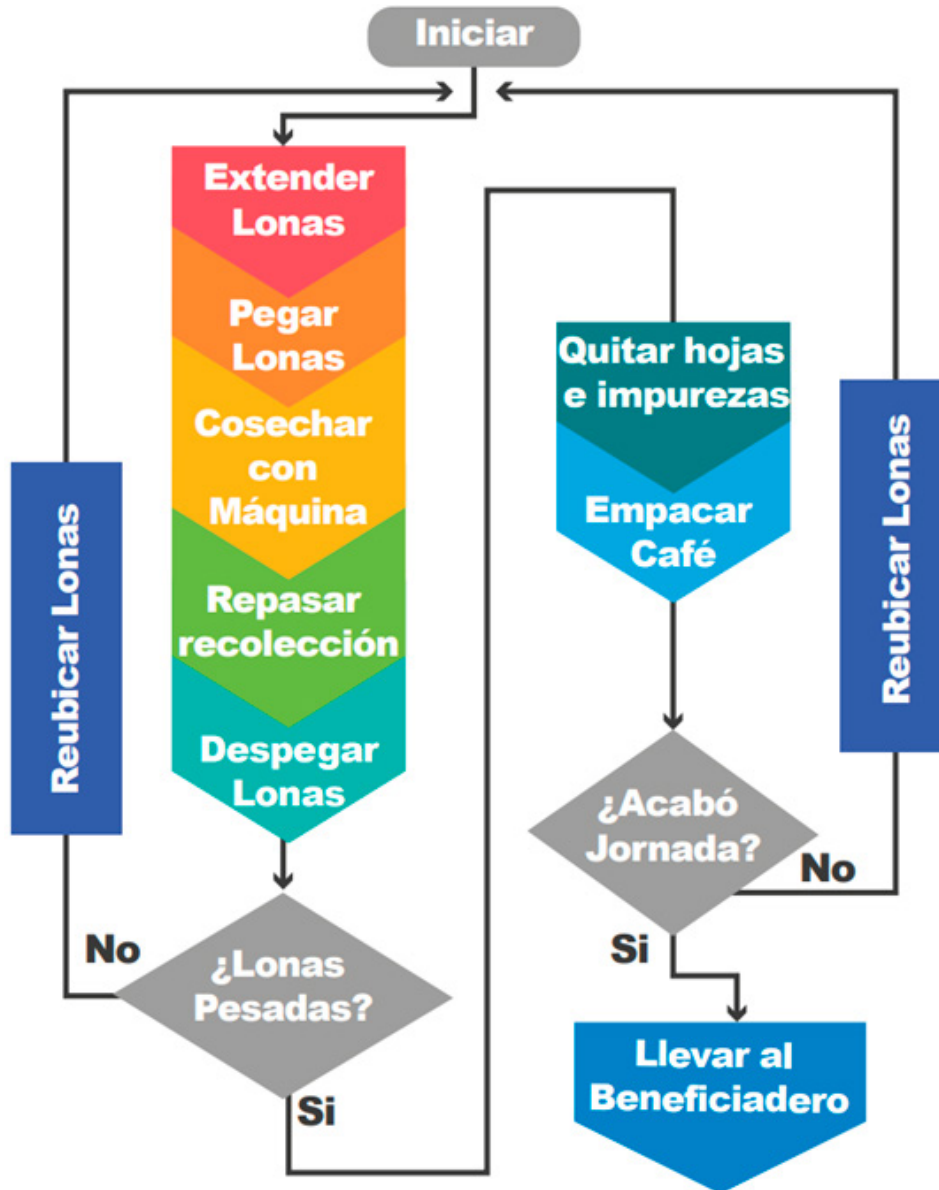
Foto 8. Cosecha asistida de café con derribadora selectiva Brudden DSC-18



Fuente: Nelson Piraneque.

Los operarios encargados de la recolección asistida con el equipo fueron entrenados tanto en el manejo de las lonas como en el uso del equipo. En ambos métodos, la recolección de descuñes se pagó al jornal y la recolección de los pases principales se pagó al kilo.

Figura 10. Diagrama de flujo de la cosecha de café con derribadora DSC-18



Fuente: Piraneque *et al.* (2022).

Análisis

Se determinó el desempeño de la cosecha manual asistida con lonas y con el empleo de la derribadora DSC-18 para compararlo con el de la técnica tradicional de recolección con coco. Con ese fin, se evaluaron la masa cosechada (kg/árbol) y los porcentajes de frutos verdes, frutos pintones, frutos maduros, frutos sobremaduros y frutos secos a partir de 1 kg

de la masa cosechada, verificando mediante el Mediverde® de la Federación Nacional de Cafeteros. También se calcularon el rendimiento de los operarios (kg/h), las pérdidas (frutos dejados en el suelo) y la eficacia (frutos maduros dejados en los árboles).

Para esta evaluación, se recurrió a estadística descriptiva, análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Duncan en aquellas variables que mostraron significancia. Asimismo, se correlacionaron las variables para determinar la asociación de cada una de ellas con la producción a través del método de Pearson. Los cálculos se hicieron mediante los softwares MS Excel, Infostat en versión libre y R 4.2.1 (disponible en <https://www.r-project.org/>).



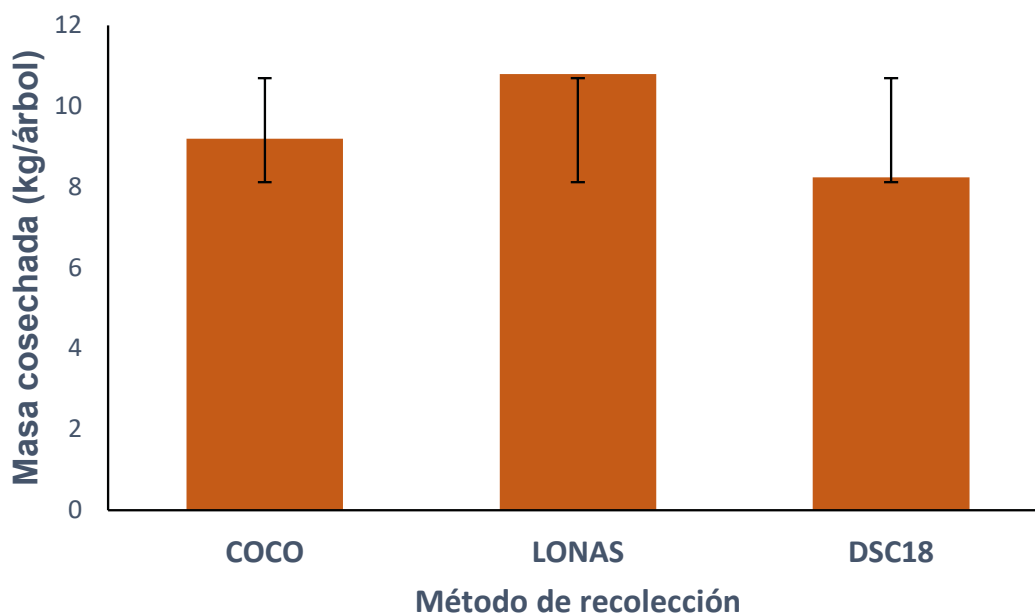
Resultados y discusión

Masa cosechada

La variable de masa cosechada no mostró diferencias estadísticas significativas (Figura 11). Sin embargo, es de resaltar que, aun con poco entrenamiento en la tecnología, se logró 25 % más de rendimiento empleando las lonas, lo que se traduce en mayores volúmenes cosechados y en mayor ingreso para los trabajadores realizando el mismo trabajo, con una mejora en la ergonomía durante la faena de cosecha (Sanz-Uribe e Hincapié, 2020).

La masa cosechada con ayuda de la derribadora fue 11 % menor que con coco, situación que se debe al poco tiempo de entrenamiento de los operarios y, por tanto, baja familiaridad con la tecnología. De todos modos, se debe anotar que el uso de este tipo de máquinas ha incrementado la producción, reduciendo los costos y aportando rapidez a los procesos de cosecha (Ferreira *et al.*, 2015).

Figura 11. Promedio de la masa cosechada de café de acuerdo con el método de recolección en la SNSM

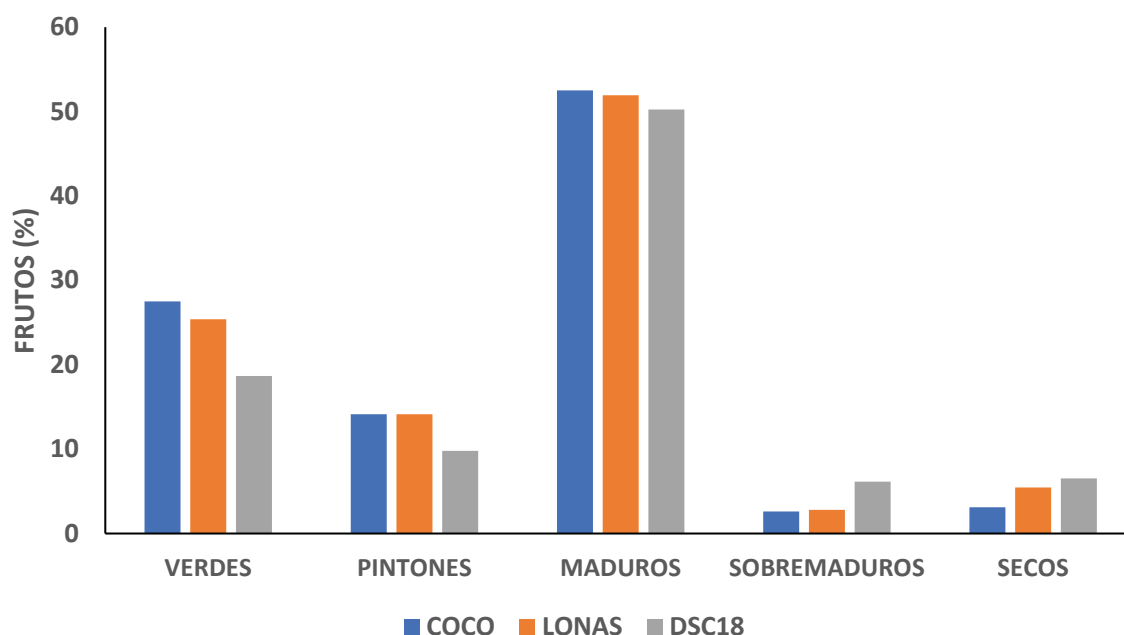


Porcentaje de frutos cosechados

La derribadora logró cosechar 81,3 % de los frutos pintones, maduros, sobremaduros y secos, mientras que con lonas se logró 74,6 %, y con coco, 72,47 % (Figura 12). Esto verifica la importancia de la concentración de frutos aptos para la cosecha y de la estrategia de reten-

ción de pases (Piraneque *et al.*, 2022; Rendón-Sáenz *et al.*, 2008). Así mismo, se demuestra que es posible el uso de la derribadora selectiva. Sin embargo, durante la experiencia se pudo verificar que las altas pendientes en la zona (>50 %) afectan negativamente la maniobrabilidad de la máquina y, por tanto, se reduce la masa cosechada. En consecuencia, es necesario que los operarios estén completamente entrenados y conozcan las propiedades de vibración para lograr la cosecha selectiva o total de los frutos, tal como lo mencionan Araque *et al.* (2006), Díaz-Gaitán *et al.* (2009) y Ferreira *et al.* (2015).

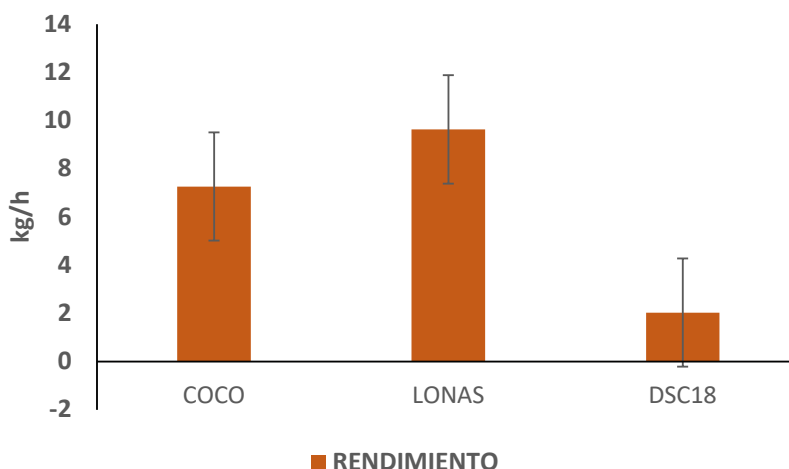
Figura 12. Promedio del porcentaje de frutos de café cosechados de acuerdo con el método de recolección en la SNSM



Rendimiento

Con el uso de la derribadora se obtiene menor rendimiento (Figura 13), situación que era de esperarse debido a la reciente introducción de la tecnología, lo que conlleva a pensar en más programas de capacitación para cafeteros y trabajadores a fin de incentivar aún más el uso de esta herramienta. El mayor rendimiento se obtuvo con el método de recolección tradicional con lonas, que permitiría que, en promedio, un trabajador logre cosechar 80 kg en un día, un estimado que se aleja de los referentes de cosechas de la zona y del interior del país, donde se tienen registros de hasta 26 kg/operario/hora (Sanz-Uribe e Hincapié Betancur, 2020). No obstante, esta proyección se acerca a lo reportado por Castañeda *et al.* (2014) para zonas con altas pendientes, cuyo rendimiento se encuentra entre 56-87 kg/operario/día.

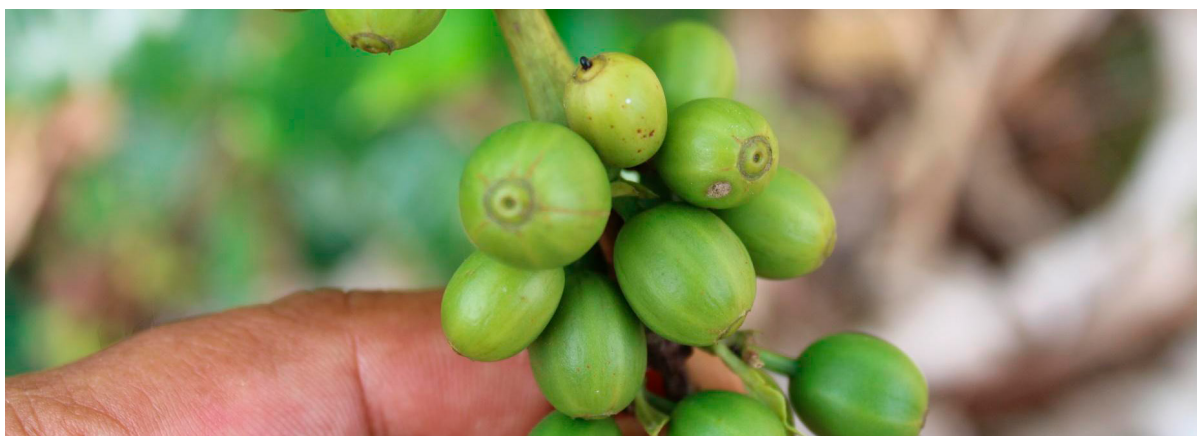
Figura 13. Rendimiento promedio obtenido con diferentes métodos de cosecha de café en la SNSM



Pérdidas

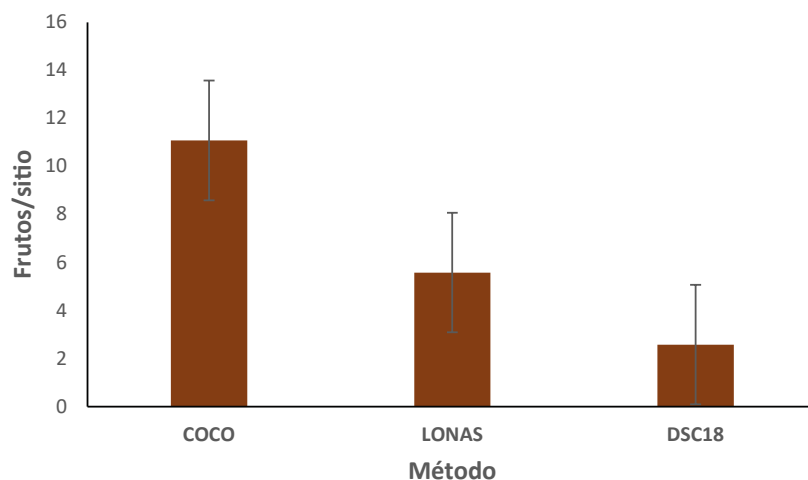
Con respecto a los frutos que quedan en el suelo luego de la recolección, el uso de lonas y el de la derribadora registraron la menor cantidad (Figura 14), que se encuentra por debajo de la recomendación para cumplir con las indicaciones de manejo integrado de la broca del café (Piraneque *et al.*, 2022; Sanz-Uribe e Hincapié Betancur, 2020). En este sentido se resalta que, al utilizar el coco, la pérdida fue 4,3 veces mayor que al emplear la derribadora y el doble de la que se obtuvo con las lonas, lo que pone de manifiesto la importancia de esta tecnología para reducir la presión por plagas, principalmente de broca de café (*Hypothenemus hampei*) (Foto 9), como lo mencionan Castañeda *et al.* (2014).

Foto 9. Frutos verdes de café con presencia de broca (*H. hampei*)



Fuente: Nelson Piraneque.

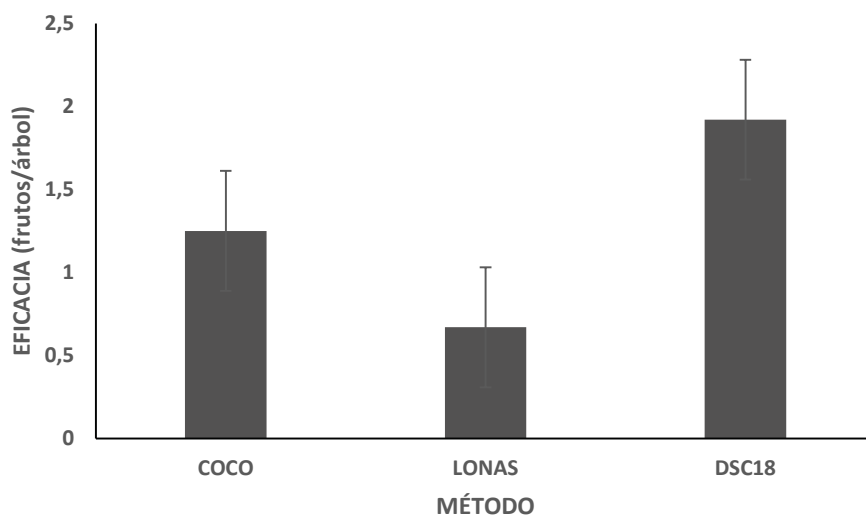
Figura 14. Frutos dejados en el suelo en cada sitio donde se implementó la recolección de café con tres métodos en la SNSM



Eficacia

La eficacia hace alusión al número de frutos maduros dejados en el árbol (Figura 15). En esta investigación todos los métodos de cosecha reflejaron números inferiores a cinco para esta variable, lo que es benéfico para el manejo integrado de plagas y permite, a futuro, una menor presión por broca del cafeto. Se resalta que con el uso de la derribadora se dejó la mayor cantidad de granos maduros en el árbol (2), mientras que al emplear las lonas y el coco se verificaron menores registros promedio al respecto, con 1,25 y 0,67, respectivamente.

Figura 15. Número promedio de frutos maduros que quedaron en el árbol de café luego de la recolección por tres métodos en la SNSM



Uso del Mediverde®

Para verificar el número promedio de frutos en los diferentes estados de maduración, se recurrió a Mediverde®, una tecnología de Cenicafé que permite, a partir de una muestra de la cosecha obtenida de forma aleatoria, estimar el promedio de granos en cada etapa (Foto 10).

Foto 10. Uso de Mediverde® para determinar porcentaje de café recogido en diferentes estados de maduración en la SNSM



Fuente: Nelson Piraneque.

El análisis mediante Mediverde® arrojó, sin diferencias estadísticas, una masa promedio de 298,84 g con el método de la derribadora, 322,12 g con lonas y 327,7 g con el uso de coco. La única diferencia que se detectó fue en el número de frutos verdes, pues la derribadora alcanzó en promedio 20,75 frutos, con diferencias estadísticas frente a lonas (11,58) y coco (7,08). Sin embargo, se resalta el hecho de que con el coco se dejó mayor masa de café en el suelo de los lotes, lo que seguramente puede repercutir en mayor presión por broca (Foto 9) para las cosechas futuras.

Consideraciones finales

No hay duda de que el uso de tecnología tiene implicaciones económicas (Lanna y Reis, 2012; Osorio, 2002) que deben ser analizadas con más tiempo de uso. No obstante, debido a la concentración de la cosecha entre octubre y febrero en la zona, se dificulta la operación de las máquinas y, por tanto, su maniobrabilidad, lo que puede afectar directamente la adopción de las tecnologías. Por ende, los aportes realizados desde la ingeniería son indispensables para lograr la sostenibilidad el sector (Oliveros-Tascón y Sanz-Uribe, 2011) y para aumentar la eficiencia en el proceso.

En este estudio, el uso de lonas fue bien recibido gracias al incremento de la masa cosechada, mientras que la derribadora presentó rechazo dadas las dificultades propias de los lotes con altas pendientes, lo que requiere mayor compromiso con el proceso de validación y adopción tecnológica a fin de mejorar la producción cafetera y, con ello, la competitividad del sector. No obstante, tampoco se desconoce que la formación y capacitación de los operarios y de los caficultores es indispensable para lograr el desarrollo agrícola (Rodríguez y Urrego, 2019) y que la aplicación tecnológica puede ser diferencial de finca a finca, como lo mencionan Wollni y Brümmer (2012).

Conclusiones y recomendaciones

El método de cosecha manual con lona se constituye como la mejor alternativa para la recolección del café en el Magdalena comparado con la recolección con coco y con la derribadora selectiva de café. De igual forma, se evidencia la influencia positiva de la experiencia en la recolección manual selectiva de los caficultores, que se traduce en mayor rendimiento del operario y en menor número de frutos remanentes en los árboles y sobre el suelo, lo que es importante para reducir la presión por plagas en el cultivo.

Por otra parte, se destaca que el uso de tecnologías amigables con el ambiente puede hacer más eficientes los procesos de cosecha y puede ser aplicado de forma sostenible en la SNSM, aunque es necesario, de todas formas, evaluar la vulnerabilidad del ecosistema. Los resultados, en últimas, tienen el potencial de ser considerados para investigaciones futuras y toma de decisiones relacionadas con el campo de estudio.





Agradecimientos

Este proyecto pretende socializar los resultados obtenidos en las recientes investigaciones realizadas por la Universidad del Magdalena y el Comité Departamental de Cafeteros del Magdalena de la Federación Nacional de Cafeteros, con el apoyo de recursos financieros provenientes del fondo Fonciencias, de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad del Magdalena, a quienes agradecemos.

A los productores, por su participación en el proyecto, atendernos en sus fincas y participar activamente en las diferentes actividades. Esperamos que este documento les ayude a tomar la decisión final respecto a la implementación de la cosecha asistida en sus cafetales.

A la magíster Rosmery Cruz, a la ingeniera Giselle Sánchez, al ingeniero Jeison Barbosa y al ingeniero Jair Mejía, por sus aportes y apoyo en la recolección de información. A los ingenieros Isabel C. Martínez, Alexander Saurith, Édgar Ramírez y todo el equipo de extensión del Comité Departamental de Cafeteros.



Referencias

- Araque, H., Oliveros, C. E., Sanz, J. R. y Ramírez, C. A. (2006). Desempeño de vibradores portátiles del tallo en la cosecha del café. *Cenicafé*, 56(4), 339-347. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/114>
- Borrella, I., Mataix, C. y Carrasco-Gallego, R. (2015). *Smallholder Farmers in the Speciality Coffee Industry: Opportunities, Constraints and the Businesses that are Making it Possible*. *IDS Bulletin*, 46(3), 29-44. <https://doi.org/10.1111/1759-5436.12142>
- Castañeda, J. A., Montoya, E. C., Oliveros, C. E. y Vélez, J. C. (2014). Evaluación de un método para la recolección de café en terrenos de alta pendiente. *Cenicafé*, 62(1), 32-47. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/467>
- Cruz-O'Byrne, R., Piraneque-Gambasica, N. y Aguirre-Forero, S. (2021). Microbial diversity associated with spontaneous coffee bean fermentation process and specialty coffee production in northern Colombia. *International Journal of Food Microbiology*, 354, 109282. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109282>
- Cruz-O'Byrne, R., Piraneque-Gambasica, N., Aguirre-Forero, S., y Ramírez-Vergara, J. (2020). Microorganisms in coffee fermentation: A bibliometric and systematic literature network analysis related to agriculture and beverage quality (1965-2019). *Coffee Science*, 15, e151773. <https://doi.org/10.25186/v15i.1773>
- Díaz-Gaitán, D., Ramírez-Gómez, C., Oliveros-Tascón, C. y Moreno-Cárdenas, E. (2009). Cosecha de café con el equipo portátil STIHL SP-81 de actuadores oscilantes. *Cenicafé*, 60(1), 41-57.
- Dietz, T., Estrella, A., Grabs, J. y Kilian, B. (2020). How Effective is Multiple Certification in Improving the Economic Conditions of Smallholder Farmers? Evidence from an Impact Evaluation in Colombia's Coffee Belt. *The Journal of Development Studies*, 56(6), 1141-1160. <https://doi.org/10.1080/00220388.2019.1632433>
- Elhalis, H., Cox, J., Frank, D. y Zhao, J. (2020). The crucial role of yeasts in the wet fermentation of coffee beans and quality. *International Journal of Food Microbiology*, 333, 108796. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108796>
- Ferreira, L. de G., Da Silva, F. M., Ferreira, D. D. y Sales, R. S. (2015). Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastes derriçadoras. *Ciência Rural*, 46(2), 273-278. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20141679>
- ICO. (2020). *Coffee Development Report. The Value of Coffee*. <https://issuu.com/internationalcoffeeorg/docs/cdr2020/2?e=46134274/85832880>
- Lanna, G. B. M. y Reis, R. P. (2012). Influence of harvest mechanization in economic and financial viability of coffee farming in Southern Minas Gerais. *Coffee Science*, 7(2), 110-121.
- López-Díaz, D. C., Montoya-Restrepo, E. C., Isaza-Gil, L. E. y Oliveros-Tascón, C. E. (2007). Contribución de los componentes del método mejorado de cosecha en el desempeño operativo de los recolectores de café. *Cenicafé*, 57(3), 187-197.
- Minagricultura (2021). *Cadena Café*. Minagricultura.
- Noticias Caracol. (2019). Máquina derribadora de café hace el trabajo de cinco recolectores [Video]. YouTube. https://youtu.be/b2mFTGrE_wg

- Oliveros, C., Peñuela, A. y Pabón, J. (2013). GRAVIMET SM Tecnología para medir la humedad del café en el secado en silos. *Avances Técnicos Cenicafe*, 1-8. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0433.pdf>
- Oliveros-Tascón, C. E. y Sanz-Uribe, J. R. (2011). Ingeniería y café en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 1(33), 99-114. <https://doi.org/10.16924/revinge.33.10>
- Oliveros-Tascón, C. E., Ramírez-Gómez, C. A., Buenaventura-Aranzazu, J. D. y Sanz-Uribe, J. R. (2005). Diseño y evaluación de una herramienta para agilizar la cosecha manual del café. *Cenicafe*, 56(1), 37-49.
- Osorio, N. (2002). Technological development in coffee: constraints encountered by producing countries. ICO. <http://dev.ico.org/documents/food.pdf>
- Piraneque, N., Aguirre, S., Ledezma, A., Martínez-Dueñas, W., Sepulveda-Cano, P., Cruz-O'Byrne, R., Barbosa, J., Sánchez, G., Ramírez, E., Ruiz, I. y Saurith, A. (2022). INNOCAFÉ: Innovación para el Desarrollo Tecnológico en la Cosecha de Café en el Departamento del Magdalena. Universidad del Magdalena. https://www.researchgate.net/publication/362505999_INNOCAFÉ_Innovacion_para_el_Desarrollo_Tecnologico_en_la_Cosecha_de_Cafe_en_el_Departamento_del_Magdalen0061
- Ramírez-Gómez, C. A., Oliveros-Tascón, C. E., Sanz-Uribe, J. R., Acosta-Acosta, R. y Buenaventura-Aranzazu, J. D. (2006). Desgranador mecánico portátil para la cosecha del café-descafé. *Cenicafe*, 57(2), 122-131.
- Ramírez, V., Robledo, A., Peña, A., Gast, F., Benavides, P., Rodrigo, J. y Marín, S. (2013). *Manual del Cafetero Colombiano*. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.
- Rendón-Sáenz, J. R., Arcila-Pulgarín, J. y Montoya-Restrepo, E. C. (2008). Estimación de la producción de café con base en los registros de floración. *Cenicafe*, 59(3), 238-259.
- Rodríguez, H. y Urrego, C. A. (2019). Análisis del aprendizaje en productores de café mediante el índice de cambio del conocimiento (ICC). *Jangwa Pana*, 18(3), 507-518. <https://doi.org/10.21676/16574923.3259>
- Santinato, F., Pereira, R., Eckhardt, C., Reis, V., Da Silva, C. y Santinato, R. (2019). Comparative performance of commonly used portable coffee harvesters. *African Journal of Agricultural Research*, 14(3), 168-172. <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13423>
- Sanz-Uribe, J. R. y Duque, H. (2020). Evaluación de la Derribadora Selectiva de Café Brudden DSC18. *Revista Cenicafe*, 71(2), Art. 2. <https://doi.org/10.38141/10778/71207>
- Sanz-Uribe, J. R. e Hincapié, J. D. (2020). Aplicación de nuevas tecnologías para la cosecha asistida de café en el departamento del Tolima. *Cenicafe*. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0006>
- Sanz-Uribe, J. R., Duque, H., Menza, H. D., Zamudio, G. E., Oliveros-Tascón, C. E. y Ramírez, C. A. (2018). Lonas para asistir la cosecha manual de café. *Avances Técnicos Cenicafe*, 487, 1-8.
- Sanz, J., Duque, H., Menza, H., Zamudio, G., Oliveros, C. y Ramírez, C. (2018). Lonas para asistir la cosecha manual de café: Programa de Investigación Científica Fondo Nacional del Café. *Cenicafe*. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4219>
- Sott, M. K., Furstenau, L. B., Kipper, L. M., Giraldo, F. D., López-Robles, J. R., Cobo, M. J., Zahid, A., Abbasi, Q. H. e Imran, M. A. (2020). Precision Techniques and Agriculture 4.0 Technologies to Promote Sustainability in the Coffee Sector: State of the Art, Challenges and Future Trends. *IEEE Access*, 8, 149854-149867. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016325>

- Vélez, J. C., Montoya, E. C. y Oliveros, C. E. (1999). Estudio de tiempos y movimientos para el mejoramiento de la cosecha manual del café. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/593>
- Wollni, M. y Brümmer, B. (2012). Productive efficiency of specialty and conventional coffee farmers in Costa Rica: Accounting for technological heterogeneity and self-selection. *Food Policy*, 37(1), 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2011.11.004>



Implementación de un sistema renovable híbrido solar-eólico y una planta de tratamiento de agua potable para los miembros de la comunidad académica de la Institución Educativa Distrital La Revuelta, Guachaca, Santa Marta

Implementación de un sistema renovable híbrido solar-eólico y una planta de tratamiento de agua potable para los miembros de la comunidad académica de la Institución Educativa Distrital La Revuelta, Guachaca, Santa Marta

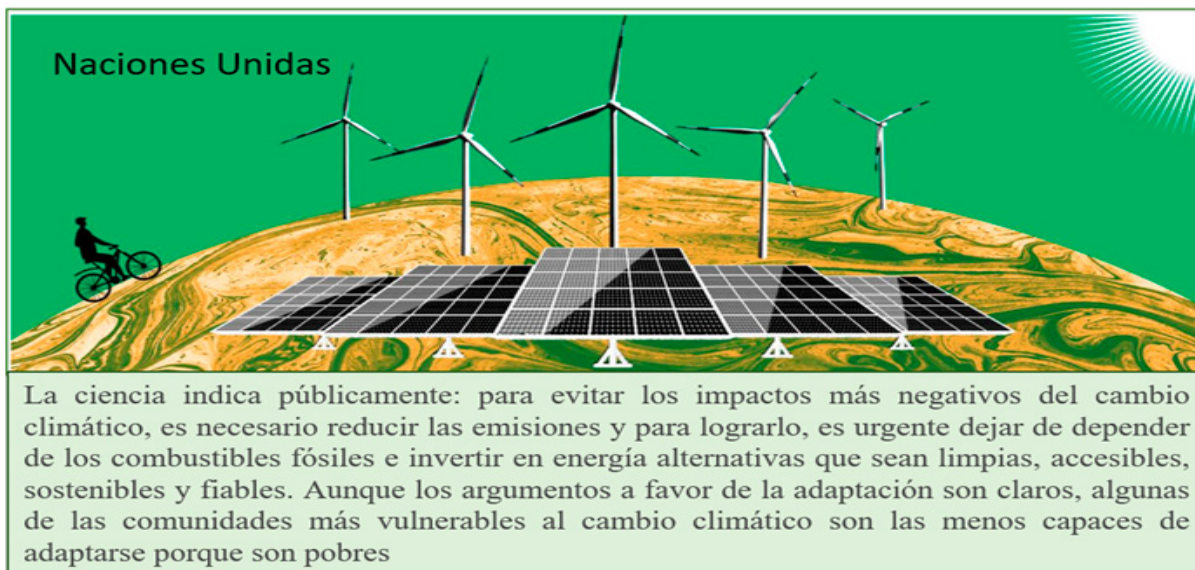


Para lograr un cambio en la dirección hacia donde vamos como especie (caos ambiental), es necesario unir esfuerzos y aplicar la ciencia y tecnología de forma que contribuya al bienestar humano y sirva a la adaptación al cambio climático, favoreciendo así a las comunidades más vulnerables. Un sistema de generación híbrido solar-eólico es una alternativa para no depender de los sistemas de energía convencional, que muchas veces no llegan a los territorios más alejados, y brinda una oportunidad de fomentar y acercar las energías renovables a una comunidad rural de la SNSM (Figura 16).

Una buena parte de las instituciones educativas rurales (escuelas) de las estribaciones de la SNSM presentan una difícil situación energética por diferentes motivos. Las tecnologías limpias, sin embargo, permiten aprovechar los recursos renovables para satisfacer necesidades primarias y suministrar energía que pueda contribuir al bienestar de los estudiantes, y de igual forma despertar el interés en la comunidad por esta área y evidenciar el cambio de actitud respecto a la propuesta por implementar en su institución.

Figura 16. Hacia el futuro de las energías alternativas para las comunidades más vulnerables

La tecnología es una forma de convertir en realidad la adaptación a cambio climático y favorecer los mas vulnerables.



Fuente: adaptado de *La Voz de Chile* (2023).

La educación es esencial para un mejor desarrollo de las comunidades, pues el conocimiento ayuda a las personas a comprender un problema, promover soluciones, cambiar sus valores y empoderar a los líderes. Si, unido a lo anterior, se implementa un proyecto tangible en la comunidad educativa y se capacita en el sector ambiental, la tecnología puede convertirse en una herramienta en la formación de los jóvenes para abrir el entendimiento de los cambios físicos del entorno al contexto. De esta forma es posible impactar para transformar el sistema actual y migrar hacia la sostenibilidad ambiental.

Hay que reconocer que los jóvenes son el futuro del planeta, por lo que resulta fundamental empoderar a esta generación y contribuirle con herramientas que le permitan mitigar el fenómeno de cambio climático. Esta es, de hecho, una responsabilidad académica.

«Somos la última generación que puede poner fin al cambio climático. Podemos hacerlo y lo haremos» (Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia [Unicef], s. f.).

Preámbulo

La demanda de energía primaria ha crecido un 19 % entre 2009 y 2019, con un destacado incremento acelerado, en particular, en los países en vía de desarrollo. Más recientemente,

en el 2021, se presentó un aumento aproximado del 4 % en la demanda energética mundial, frente a la cual las energías renovables siguen desempeñando un papel importante. Así, a pesar de los impactos ocasionados por la pandemia del COVID-19, estas últimas tuvieron un incremento récord en capacidad instalada en el 2021, adicionando un total de 314 GW (Agencia Internacional de las Energías Renovables [IRENA], 2022).

Según el último reporte global presentado por IRENA (2022), al finalizar el 2020 el 21,6 % de la energía primaria del mundo fue producida utilizando energías renovables. De este porcentaje, el 12,6 % se obtuvo a partir de energías renovables modernas como la hidroeléctrica, la geotérmica, la eólica, el biogás y la solar. El 9,0 % restante fue generado a partir de la biomasa tradicional en las zonas rurales de países en vía de desarrollo, en donde se utilizan leña, residuos de cosechas y estiércol de animales para cocinar, producir calor en las viviendas y obtener iluminación.

El anterior panorama deja en evidencia que en muchas ocasiones las necesidades energéticas de las zonas rurales de países en vía de desarrollo se suplen con combustibles basados en biomasa. Esta situación, sin embargo, restringe la mejora en la calidad de vida y en la producción agrícola de las comunidades rurales. Para el caso de Colombia, en dichas áreas existe un gran potencial para implementar soluciones de suministro energético utilizando energía solar fotovoltaica, eólica, de biomasa y microcentrales hidroeléctricas, particularmente considerando los elevados costos de instalación, mantenimiento y operación de la red convencional energética en aquellas áreas de difícil acceso (Robles-Algarín y Rodríguez-Álvarez, 2018).

En Colombia el sistema interconectado nacional se ha caracterizado por adquirir fortaleza y confiabilidad después de las crisis energéticas de 1991 y 2015, cuando el país sufrió apagones programados como método de racionamiento. No obstante, este aún no cuenta con la capacidad para atender todo el territorio nacional, especialmente por aspectos geográficos y orográficos. En muchas regiones, el accidentado paisaje hace muy difícil desarrollar la red de interconexión y suministro, dejando a las comunidades que históricamente han habitado zonas rurales del país sin el servicio de energía eléctrica (Pinilla, 2016).

El departamento del Magdalena, sus cabeceras municipales, corregimientos y veredas, no están por fuera de la difícil realidad energética. Puntualmente, este territorio tiene uno de los retos más desafiantes a nivel de infraestructura. Zonas tan importantes como la SNSM, que se ubica como un triángulo que toca dos departamentos más (Cesar y La Guajira), en donde habitan en su mayoría grupos indígenas y campesinos y que por su belleza atrae cada vez a más personas de todo el país y el extranjero para conocer sus tesoros naturales, se encuentran por fuera del sistema interconectado nacional. Tal es el caso de veredas como Santa Clara, Sacramento y zonas rurales de municipios como San Ángel y Mingueo (Sistema de Información Eléctrico Colombiano [SIEL], 2016).

Al mismo tiempo, en estas zonas descritas se sitúan instituciones educativas distritales que requieren energía, agua potable y conectividad. En algunos casos, el suministro de energía para estas instituciones se realiza con base en combustibles fósiles como gasolina

o diésel, sin resolver de fondo la disponibilidad constante y confiable de energía eléctrica. De hecho, estos sistemas se convierten en ineficientes y suponen una gran exigencia técnica y de mantenimiento para comunidades vulnerables y con recursos escasos.

A la difícil realidad energética señalada para las zonas rurales se suma la problemática existente con el suministro de agua potable. En Colombia, las regiones con mayor escasez de este servicio se concentran en el Caribe (Santa Marta y La Guajira), donde el índice de aridez es alto y la evapotranspiración supera la precipitación. Por lo tanto, se presentan afectaciones por sequía, que implican la reducción de los volúmenes de lluvia y déficit de agua potable (Álvarez *et al.*, 2013).

El consumo de agua no tratada representa un elevado riesgo para la salud, puesto que no garantiza su calidad. Como resultado, se presentan situaciones endémicas como cólera, diarreas, parasitismo, fiebre tifoidea, salmonelosis, entre otras. Asimismo, la mala hidratación disminuye la concentración y el rendimiento físico y de la memoria, a la vez que aumenta el cansancio a corto plazo. Cuando esta situación se repite, la deshidratación incrementa el esfuerzo cardiovascular, lo que eleva la posibilidad de enfermedad cardíaca (Rodríguez Miranda *et al.*, 2016).

Las áreas rurales son las más perjudicadas en el tema de la calidad del agua, pues muchas no tienen acueductos, o estos no cuentan con un sistema de tratamiento de agua. Los departamentos que presentan la peor calidad en el agua potable son Cauca, Magdalena, Córdoba y La Guajira, en los cuales mucha de la población rural está en riesgo medio o muy alto de adquirir enfermedades por la baja calidad del agua que se consume (Infobae, 2022, p. 1).

En el caso particular del distrito de Santa Marta, la crisis del agua ha venido aumentando por la falta de recurso hídrico, el crecimiento poblacional, la población flotante por turismo y el asentamiento de población desplazada de Venezuela. Esto, unido a factores climáticos, el deterioro de los recursos naturales y la falta de gestión integral del territorio, ha generado una comercialización del recurso sin sentido ético ni responsabilidad social, afectando las áreas más vulnerables.

Con esta perspectiva, la Universidad del Magdalena, que se ubica al pie de la SNSM, y sus grupos de investigación, liderados por Magma Ingeniería y Suelo, Ambiente y Sociedad, desarrollaron una intervención en la Institución Educativa Distrital (IED) La Revuelta, de la zona rural de la ciudad de Santa Marta; específicamente, en la vereda de Nuevo Horizonte (San Rafael) del corregimiento de Guachaca. Este proyecto consistió en el diseño de una solución integral que respondiera a las necesidades de este sector mediante la implementación de un sistema renovable híbrido solar-eólico y una planta de tratamiento de agua potable (PTAP), con el fin de energizar dispositivos adecuados para la conservación de alimentos perecederos y luminarias o sistemas de telecomunicaciones, así como brindar agua potable a todos los miembros de la comunidad académica.

Para la implementación se priorizó la IED La Revuelta debido a su vocación ambiental y a su ubicación estratégica. De esta forma se generó un impacto en las actividades diarias y en la calidad de vida de los beneficiados: niños de escasos recursos económicos que conviven alrededor de una familia y de un centro educativo. Además de este avance tecnológico, se trabajaron prácticas sostenibles para el entorno, valorando el desarrollo de la ciencia y la tecnología de cara a la conservación del contexto donde habitan.

Con este tipo de proyectos, el grupo de trabajo busca fortalecer el proceso de enseñanza-aprendizaje motivando el acceso a la escuela de los educandos, mejorando condiciones de infraestructura y contribuyendo a cerrar brechas científicas y tecnológicas en zonas rurales de bajo presupuesto. Es de anotar que los resultados de este caso de estudio hacen parte del proyecto de investigación «Sistema de generación híbrido solar-eólico para brindar servicios de primera necesidad en instituciones educativas distritales de las zonas rurales de Santa Marta, Colombia», financiado por Minciencias en la Convocatoria 808-2018.

Resumen

En el mundo moderno, la electricidad es un factor primordial para la industrialización, la urbanización y el crecimiento financiero de cualquier país. En Colombia aún existen muchas zonas rurales que carecen de este servicio, lo cual desmejora la calidad de vida de los habitantes, ralentiza el progreso y aumenta la percepción de desigualdad social y económica. Estas comunidades generalmente obtienen electricidad proveniente de plantas diésel u otros sistemas de generación basados en combustibles fósiles. Sin embargo, el incremento en los costos de estos equipos y el alto impacto que representan sus emisiones al ambiente son algunos de los factores que justifican la tendencia en aumento del uso de sistemas de generación renovables. A esta compleja realidad energética del entorno rural se suma la problemática existente con la calidad del agua en estas regiones, que en muchas ocasiones consumen agua no apta para el consumo humano.

Considerando el anterior contexto, en este proyecto se implementó un sistema de generación híbrido solar-eólico y una PTAP en la IED La Revuelta, sede San Rafael, ubicada en la zona rural del distrito de Santa Marta, con el fin de mejorar el acceso a la energía y entregar agua potable para todos los miembros de la comunidad académica. El objetivo de esta intervención fue priorizar una institución educativa rural con vocación ambiental para generar un impacto en las actividades diarias y en la calidad de vida de sus beneficiados: niños de escasos recursos económicos que conviven alrededor de una familia y de un centro educativo. De esta forma se instaló un sistema híbrido con una potencia máxima de 2.750 Wp que permite energizar la PTAP, de 420 l/hora, así como dispositivos para la conservación de alimentos perecederos, luminarias y equipos de comunicaciones.

Con el fin de que todos los integrantes de la comunidad académica se apropiaran del proyecto para su correcta operación y mantenimiento en el tiempo, se desarrollaron una

serie de capacitaciones en gestión integral del recurso del agua, sostenibilidad de las fuentes hídricas y diseño y mantenimiento del sistema de generación solar-eólico y de la planta de tratamiento de agua potable. Como resultado, hubo una exitosa intervención tecnológica en la IED seleccionada, beneficiando a toda la comunidad académica con agua potable y energías renovables.

Además, se generó un mapa de idoneidad para la instalación de sistemas híbridos solares-eólicos en el distrito de Santa Marta, el cual se obtuvo con la integración de la herramienta de toma de decisiones multicriterio del proceso analítico jerárquico (AHP) y sistemas de información geográfica (SIG). Estos insumos pueden facilitar los trabajos futuros que busquen llevar este tipo de tecnologías a diferentes sectores rurales de la ciudad.

Palabras clave: energía solar, energía eólica, energías renovables, plantas de tratamiento de agua potable, zonas rurales de Santa Marta, sistemas híbridos.

Abstract

In the world, electricity is an essential factor for the industrialization, urbanization, and financial growth of all countries. In Colombia there are still many rural areas that lack this service, which deteriorates the quality of life of the inhabitants, slows down progress and increases the perception of social and economic inequality. These communities obtain electricity from diesel plants or other fossil fuel-based generation systems. The increase in the costs of these systems and the high impact that their emissions represent to the environment are some of the factors that justify the increasing trend in the use of renewable generation systems. In addition to the complex energy reality of rural areas, there is also the existing problem with water quality in these regions, which often consume water that is not suitable for human consumption.

Considering the previous context, in this project a hybrid solar-wind generation system and a Drinking Water Treatment Plant (DWTP) were implemented in the rural educational institution La Revuelta, sede San Rafael, located in the rural area of the district of Santa Marta, to improve access to energy and provide drinking water for all members of the academic community. The objective of the project was to prioritize a rural educational institution with an environmental vocation to generate an impact on daily activities and the quality of life of its beneficiaries, children with limited economic resources who revolve around a family and an educational center. The hybrid system has a maximum power of 2750 Wp and allows powering the 420 l/hour water treatment plant, as well as devices for the preservation of perishable food, lighting, and communications equipment.

For all members of the academic community to take ownership of the project for its correct operation and maintenance over time, a series of training sessions were performed on the integral management of water resources, sustainability of water sources, design and

maintenance of the solar-wind system and the drinking water treatment plant. This way, a successful technological intervention as a result in a rural educational institution in the district of Santa Marta, benefiting the entire academic community with drinking water and renewable energy was obtained.

In addition, a suitability map was generated for the installation of hybrid solar-wind systems in the district of Santa Marta, which was obtained with the integration of the multi-criteria decision-making tool of the analytical hierarchical process (AHP) and geographic information systems (GIS); which facilitates future work that seeks to bring this type of technology to different rural sectors of the city.

Keywords: solar energy, wind energy, renewable energy, drinking water treatment plants, rural areas of Santa Marta, hybrid systems.

Desarrollo del caso de estudio

Selección de la institución educativa rural

Considerando que el equipo de trabajo contaba con recursos para intervenir solo a una institución educativa ubicada en las zonas rurales del distrito de Santa Marta, se implementó una metodología de selección multicriterio con el método del proceso analítico jerárquico (AHP) y sistemas de información geográfica (SIG), con el fin de establecer las zonas idóneas para la instalación de un sistema híbrido solar-eólico. Una vez definidas estas últimas, se procedió con la selección de la institución educativa, la cual debía estar ubicada en alguno de estos sectores elegidos (Olivero-Ortiz *et al.*, 2021).

Los criterios y subcriterios considerados para este estudio de idoneidad se obtuvieron después de una revisión bibliográfica de investigaciones relacionadas con la determinación de zonas aptas para la implementación de un sistema híbrido (Ali *et al.*, 2019; Anwarzai y Nagasaka, 2017). Como resultado de esta actividad, se escogieron siete subcriterios, agrupados en tres categorías, que fueron ponderados según la metodología establecida por el AHP. El modelo jerárquico para este problema de decisión se presenta en la Figura 17.

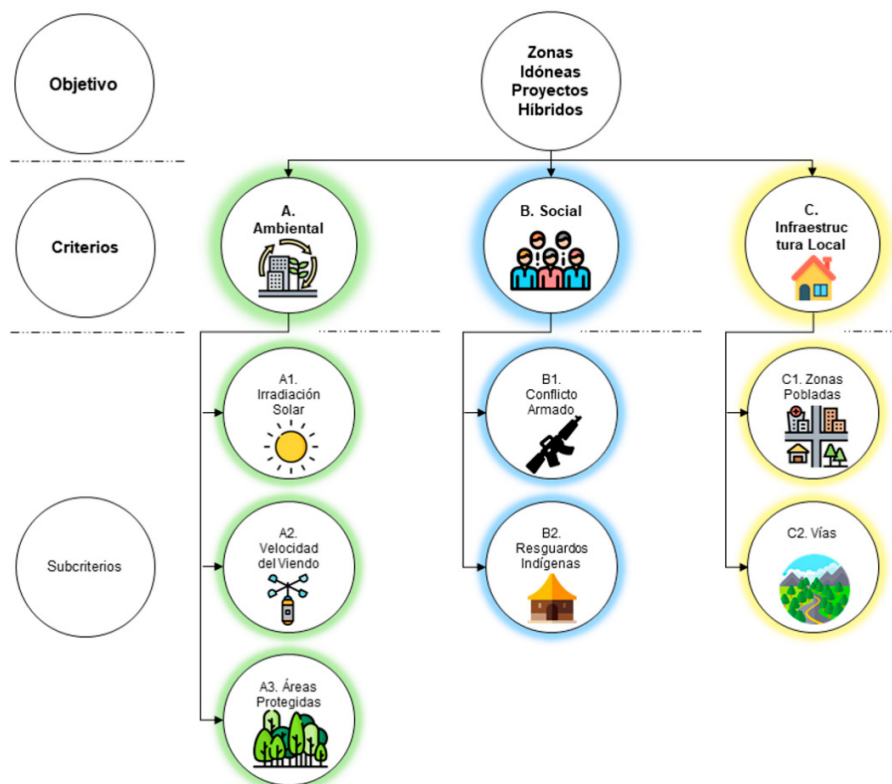
En la aplicación del método AHP, se consultaron un total de 10 expertos de sectores académicos, técnicos y empresariales que han planificado o desarrollado proyectos de energías renovables en zonas rurales de Colombia. Las valoraciones de estos profesionales fueron recogidas y analizadas por medio de la versión de prueba del software Expert Choice, en donde se obtuvieron los pesos para cada criterio de la estructura jerárquica. El método plantea una comparación por pares entre criterios, facilitando su aplicación. En la Tabla 2 se muestra la escala que se utilizó para recolectar los juicios de los expertos, la cual fue propuesta por Saaty para el método multicriterio del AHP (Robles-Algarín *et al.*, 2017).

Tabla 2. Escala del AHP para la comparación por pares

Rango numérico	Definición
1	Criterio A tiene igual importancia que el criterio B.
3	Criterio A es moderadamente más importante que el criterio B.
5	Criterio A es fuertemente más importante que el criterio B.
7	Criterio A es muy fuertemente más importante que el criterio B.
9	Criterio A es extremadamente más importante que el criterio B.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios.
Recíprocos	Si el criterio A tiene asignado uno de los números anteriores cuando se compara con el criterio B, entonces este último tiene el valor recíproco en comparación con el A.

Fuente: Robles-Algarín *et al.* (2017).

Figura 17. Estructura jerárquica para el problema de decisión



Fuente: elaboración propia con base en Olivero-Ortiz *et al.* (2021).

Una vez definidos los criterios de selección y su ponderación, se realizó el procesamiento digital de los mapas geográficos asociados a los siete subcriterios utilizando SIG. Los mapas para cada criterio se obtuvieron de fuentes como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL), el *Atlas eólico global*, Naciones Unidas (ONU) y el Registro Único Nacional de Áreas Protegidas (RUNAP). El resultado final es un mapa con las zonas idóneas del distrito de Santa Marta para la implementación de proyectos solares-eólicos.

Dimensionamiento del sistema híbrido renovable solar-eólico

Luego de haber seleccionado la IED para la intervención tecnológica, se procedió con el dimensionamiento del sistema híbrido solar-eólico, aprovechando al máximo el recurso de la región. Para ello, se estudió la información de fuentes meteorológicas especializadas como el *Global Solar Atlas*, el *Global Wind Atlas* y el *Atlas de radiación solar de Colombia*. A partir de estos referentes, se estimó una disponibilidad de 4,5 kWh/m² para el recurso solar y una velocidad del viento entre 1-5 m/s para el recurso eólico en la zona de estudio.

Posteriormente, el sistema de energía híbrido se dimensionó considerando como cargas la planta de tratamiento de agua, las luminarias, el sistema de refrigeración de bajo consumo para la conservación de alimentos y un sistema de conectividad que respaldara al sistema de monitoreo de variables ambientales. En la Tabla 3 se muestra el cuadro de cargas utilizado para esta labor, en el cual se determinó un requerimiento total de 4.826 Wh, con una potencia de 1.044 W. Todas las cargas funcionan a 120 V con una sola fase.

Tabla 3. Cuadro de cargas

Descripción de la carga	Potencia (W)	Horas de uso	Energía (Wh)	Aplicación
Bomba de recirculación 1	375	4	1.500	Tratamiento de agua
Bomba de recirculación 2	375	4	1.500	Tratamiento de agua
Lámpara ultravioleta	36	4	144	Tratamiento de agua
Bomba dosificadora	24	4	96	Tratamiento de agua
Solenoides	24	4	96	Tratamiento de agua
Medidor de sólidos disueltos totales	5	4	20	Tratamiento de agua
Pilotos LED	15	4	60	Tratamiento de agua
Iluminación LED	15	4	60	General
Nevera de bajo consumo 200 l	150	8	1.200	Conservación de meriendas y alimentos
Módem de internet	25	6	150	Conectividad

Fuente: elaboración propia a partir de *Global Solar Atlas*, *Global Wind Atlas* y *Atlas de radiación solar de Colombia*.

Con el fin de entregar a la institución educativa un sistema de generación robusto, en el que posteriormente se puedan incluir mayor número de cargas, se dimensionó el componente solar para entregar una potencia pico máxima, sin pérdidas, de 2.310 Wp, y el componente eólico con aerogenerador de eje vertical de 500 W. Así, el sistema solar, considerando un porcentaje por pérdidas internas del 15 %, puede generar 8.606 Wh por día, superando el requerimiento energético inicial de 4.826 Wh por día (Tabla 4).

Tabla 4. Datos del generador solar fotovoltaico

Descripción	Valor
Potencia del módulo solar	375 W
Hora solar promedio	4,5 h
Número de módulos solares	6
Generación estimada sin pérdidas	10.125 Wh
Generación estimada con pérdidas	8.606 Wh
Requerimiento energético	4.826 Wh

Fuente: elaboración propia a partir de datos colectados en campo.

Para el respaldo del sistema, se implementó un banco de baterías de litio de 200 Ah a 24 V, el cual fue calculado para un día de autonomía con una profundidad de descarga de 80 %. Al respecto, cabe precisar que las baterías de iones de litio se han implementado en diferentes tipos de equipos electrónicos de consumo masivo como equipos de comunicaciones, equipos portables y portátiles, y representan una muy buena alternativa a las baterías de plomo convencionales. Adicionalmente, permiten alargar la vida útil de las soluciones de almacenamiento de energía y ofrecen ventajas en cuanto a las densidades de potencia y de energía y el peso. Sin embargo, esta tecnología representa retos importantes en cuanto a la regulación, la elección del acumulador comercial disponible y la integración con tecnologías existentes.

Además del banco de batería, se seleccionó un inversor híbrido de 2.000 W/24 V que incorpora un controlador del punto de máxima potencia (MPPT) de 80 A. De esta manera se garantiza que el sistema soporte los picos de potencia ocasionados en el arranque de las dos bombas de ½ HP incorporadas en la planta de tratamiento de agua. En la Tabla 5 se muestran todos los dispositivos que fueron dimensionados y seleccionados para la instalación del sistema híbrido, en el cual se incluye un generador eólico de 500 W, que aporta en el proceso de generación a pesar de la naturaleza aleatoria del viento en la zona de estudio.

Tabla 5. Componentes del sistema híbrido

Ítem	Cantidad
Módulo fotovoltaico monocristalino con tecnología PERC 72 Cells y potencia de 385 Wp (certificado RETIE)	6
Rieles metálicos y accesorios en aluminio anodizado para instalación de módulos solares sobre techo	1
Batería LIFEPO4 12 – 200 AH	2
Rack metálico de 1,5 m de altura para baterías	1
Inversor híbrido de 3.000 W/24 V salida de 220 V 60 Hz. Entrada DC24V y controlador de carga MPPT 80 A incluido	1
Regulador de carga MPPT 60 A 150VDC	1
Generador eólico de 500 W 24 V de eje vertical y velocidad de arranque de 1,3 m/s, con regulador de carga híbrido	1
Poste metálico con accesorios de soporte para instalación de aerogenerador	1
Gabinetes metálicos para instalación	2
Descargador de sobretensiones DPS tipo II 150 VDC	1
Fusible ultrarrápido en DC 100/200 A 250VDC	1
Caja de conexiones solares: 2 entradas, 1 salida	1
Protecciones en AC (inversor)	1
Cable solar 6 mm Q 1.800VDC	200 m
Cableado de potencia DC	20 m
Materiales eléctricos de instalación	1

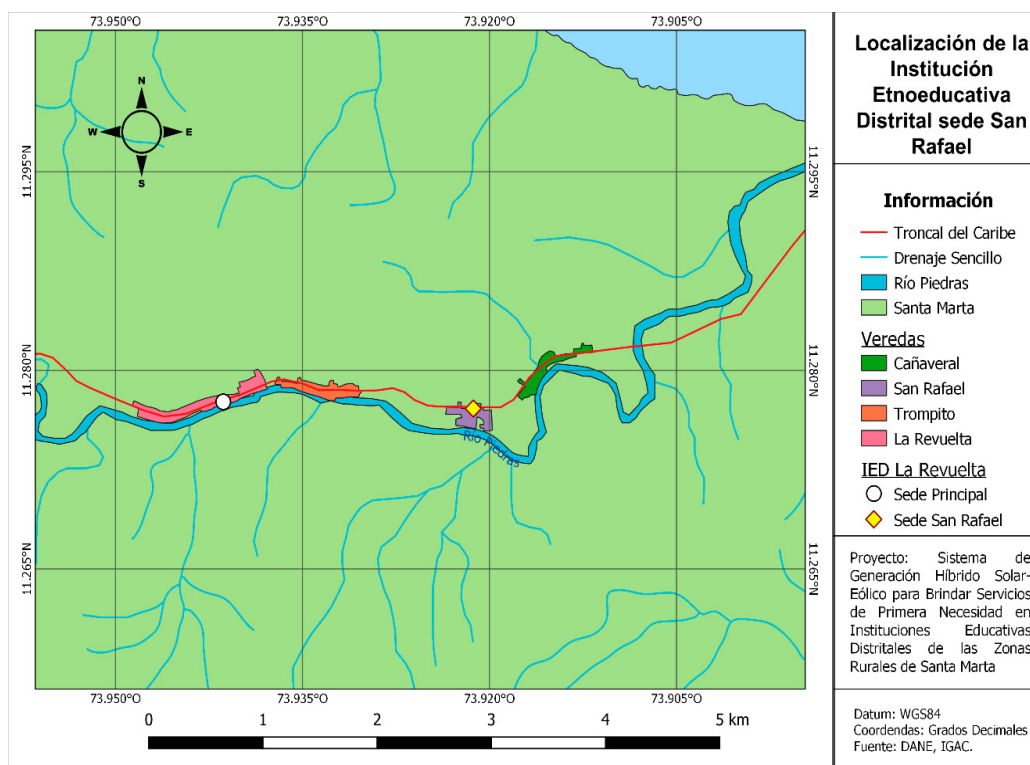
Diagnóstico ambiental de la IED La Revuelta

La información primaria para el diagnóstico ambiental de la IED La Revuelta se obtuvo por medio de las entrevistas realizadas a habitantes del sector y encargados de la institución en San Rafael. Para la información secundaria se consultaron las bases de datos de la Alcaldía de Santa Marta, la Corporación Autónoma Regional del Magdalena (Corpamag), el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y el IGAC. Además, fueron de utilidad los estudios investigativos de la Universidad del Magdalena enfocados en la zona. Asimismo, se llevaron a cabo análisis de laboratorio de la calidad de agua en la IED.

Zona de estudio

La IED La Revuelta, sede San Rafael, está ubicada en la zona rural de la ciudad de Santa Marta, Magdalena; específicamente, en la vereda de Nuevo Horizonte (San Rafael), del corregimiento de Guachaca, en el kilómetro 30 de la vía Troncal del Caribe Santa Marta-Riohacha (Figura 18). Esta institución cuenta con nueve sedes entre las veredas de México y San Rafael, en las que atiende a 1.184 estudiantes entre primaria y bachillerato.

Figura 18. Localización de la sede San Rafael



Fuente: elaboración propia a partir de datos del DANE y el IGAC.

La fuente de agua más cercana es el río Piedras. En sus alrededores también se encuentran el río Mendihuaca y las quebradas Dante, Manzanares, Paloquemao y Jordán. El río Piedras es el segundo afluente más largo del municipio, con una longitud de 38,4 km; nace a 2.305 m s. n. m., en las estribaciones de la SNSM, y desemboca en el mar Caribe. La cuenca es una de las fuentes abastecedoras del acueducto de Santa Marta, y los puntos abastecedores se encuentran a la altura de la quebrada La Lisa y La Cuchilla de San Lorenzo.

La sede San Rafael se encuentra ubicada en la cuenca del río Piedras; específicamente, en la subcuenca entre San Isidro y mar Caribe, lugar donde el afluente se convierte a orden 6. Este tramo tiene un drenaje meándrico que presenta trayectos trenzados y acumulaciones de sedimentos. A su paso abastece a las poblaciones de las veredas La Revuelta, El Trompito y Cañaveral. Además, tiene un área muy pequeña, de 81,58 km², y un coeficiente de compacidad de 1,56 con forma oval oblonga a rectangular oblonga, lo que representa una menor vulnerabilidad a lluvias de alta intensidad y corta duración, es decir, un menor riesgo a eventos torrenciales.

Planta de tratamiento de agua

Luego del diagnóstico del entorno ambiental, se procedió con el proceso de diseño e implementación de la PTAP, con el fin de suministrar agua potable a todos los miembros de la comunidad académica de la sede San Rafael y las demás sedes cercanas en las inmediaciones de la troncal del Caribe.

Se realizó un análisis preliminar de la calidad del agua en la sede de la IED que sería intervenida con el proyecto tecnológico (La Revuelta) y en tres sedes adicionales ubicadas en el sector de Guachaca (sedes principal, México y Calabazo). Se llevaron a cabo entrevistas a los profesores de las escuelas sobre la calidad de agua y su servicio. También se hizo un reconocimiento de las instalaciones sanitarias que tenían las instituciones con el fin de conocer las condiciones en que se encuentran.

Las muestras de agua se recolectaron en época seca y en la lluviosa. Los puntos de muestreo se ubicaron cerca de las comunidades que se abastecen del río, donde se realizaron medidas *in situ* de pH, temperatura y conductividad eléctrica mediante multiparámetro T82 de Hanna Instruments. Las muestras por quintuplicado fueron extraídas del centro del río, donde el flujo es estable, y se tomaron en envases plásticos de 2 l de capacidad para evaluar los parámetros fisicoquímicos y de 0,25 l para examinar la microbiología. El muestreo, la conservación y el análisis de las muestras se realizaron de conformidad con la 23.^a edición del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Lippes *et al.*, 2012).

Las muestras de agua fueron debidamente marcadas y preservadas en cavas con hielo con el fin de mantenerlas a temperatura de 4 °C para su transporte hasta el laboratorio de calidad de agua de la Universidad del Magdalena, donde se realizaron los diferentes análisis. Los métodos utilizados se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. Métodos utilizados para el análisis de las muestras de agua

Parámetro	Método
Coliformes totales y <i>Escherichia coli</i>	Filtración por membrana
Conductividad	Electrométrico
pH	Potenciométrico
Turbidez	Nefelométrico

Fuente: Cabrera y Fernández (2020).

Luego de conocer el estado del agua, se realizaron visitas a la IED La Revuelta con proveedores de plantas de tratamiento de agua con el fin de determinar la mejor opción para implementar considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales.

Capacitaciones

Para realizar una transferencia tecnológica, se realizaron un conjunto de capacitaciones dirigidas a los miembros de la comunidad académica de la IED La Revuelta, sede San Rafael, en la gestión integral del recurso del agua, sostenibilidad de las fuentes hídricas (cobertura vegetal, ronda de ríos, cercas vivas, uso y manejo sostenible del recurso, calidad y gestión) y diseño y funcionamiento de sistemas de generación renovables (solares y eólicos). También se capacitó a la comunidad académica en el mantenimiento y operación de la PTAP y del sistema híbrido solar-eólico, generando un compromiso y sentido de pertenencia de los estudiantes con el proyecto y su alto impacto social.

Finalmente, se diseñó un cuestionario para medir el grado de satisfacción con el proyecto y posibles oportunidades de mejora para intervenciones futuras en otras instituciones. Se decidió utilizar este instrumento puesto que permite una comunicación efectiva entre el encuestado y el encuestador a través de un conjunto de preguntas que les permiten a los participantes consultados sentar sus puntos de vista (Balestrini, 2006).

El cuestionario se estructuró en ocho preguntas cerradas con escala tipo Likert y una pregunta abierta. Se implementó una validez de contenido con la consulta a expertos, y la confiabilidad se determinó con el alfa de Cronbach, que es un método ampliamente utilizado por los investigadores para establecer la confiabilidad de los cuestionarios en situaciones donde se desea medir un atributo o contenido, como es el caso del presente trabajo. De este modo, se ejecutó una prueba piloto con el cuestionario de nueve preguntas a cinco estudiantes y docentes diferentes a los de la población de estudio, en la que se obtuvo una confiabilidad aceptable de 0,81 (Hernández-Sampieri *et al.*, 2014).

Resultados de la intervención tecnológica

Mapa de idoneidad para la instalación de sistemas híbridos

El primer aporte de la intervención tecnológica que se realizó con la presente investigación consiste en un mapa de idoneidad que presenta las zonas aptas y no aptas para la instalación de sistemas híbridos en el distrito de Santa Marta. Para obtenerlo, primero se procesaron los juicios de los expertos con el fin de obtener el peso de los criterios mediante el método AHP. En la Tabla 7 se muestran los resultados.

En general, todos los criterios fueron considerados relevantes por los expertos, pero se destaca el alto nivel de importancia obtenido para aspectos sociales como los resguardos indígenas (0,534) y el conflicto armado (0,466). En general, los aspectos sociales (0,434) y los ambientales (0,369) son los que se destacaron por su mayor pertinencia para este estudio. Es posible suponer que esta valoración refleja el posible entorno en el que se desarrolló el proyecto de energía renovable, donde hacen presencia las comunidades indígenas pertenecientes al resguardo indígena kogui-malayo-arhuaco, así como grupos armados.

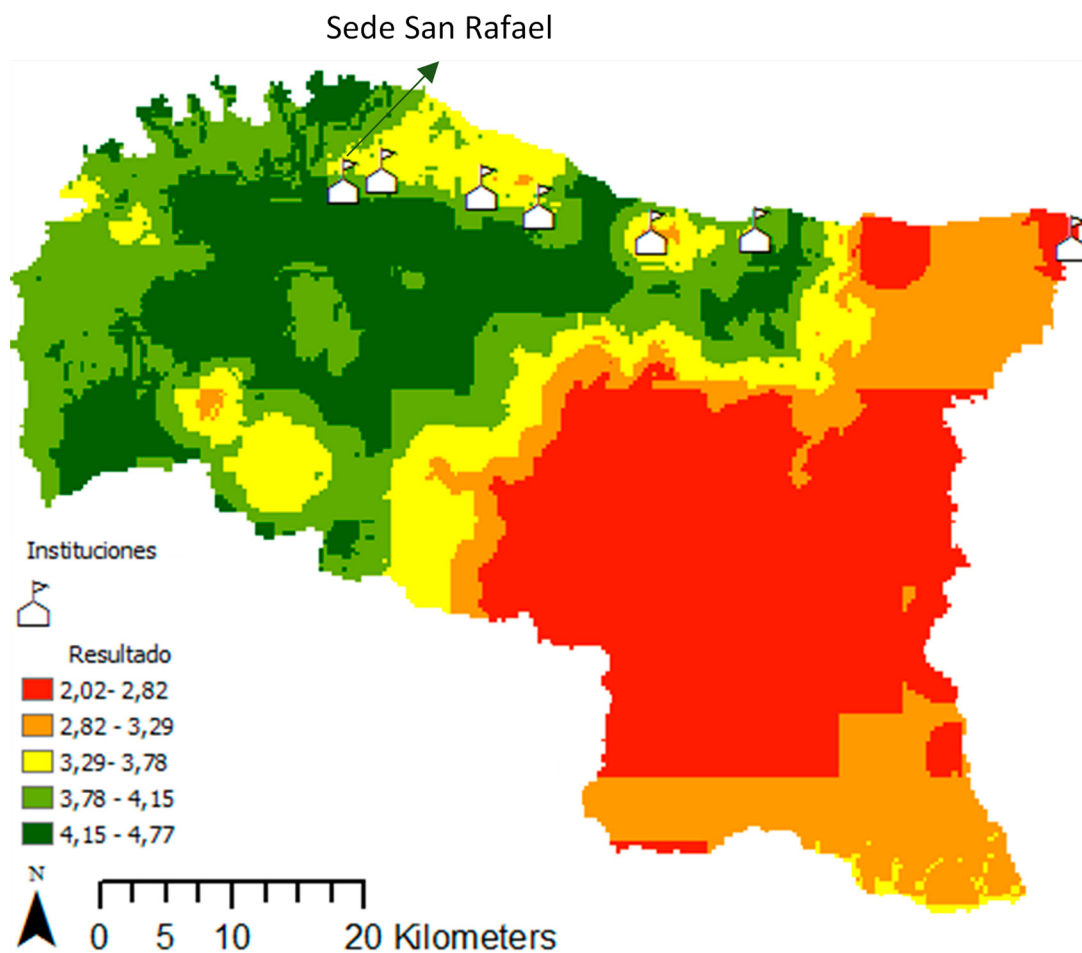
Tabla 7. Resultados para los criterios

	Criterio ambiental (0,369)			Criterio social (0,434)		Criterio infraestructura local (0,197)	
	Radiación global horizontal	Velocidad del viento	Áreas protegidas	Resguardos indígenas	Conflicto	Zonas pobladas	Vías
Valoración expertos (AHP)	0,470	0,376	0,154	0,534	0,466	0,644	0,356

Fuente: elaboración propia con base en los resultados obtenidos a partir de juicio de expertos.

Con los pesos obtenidos en la Tabla 7 para los subcriterios, se realizó el proceso de reclasificación de los mapas con herramientas SIG para obtener el consolidado de zonas aptas y no aptas que se muestra en la Figura 19, donde se resaltan las siete instituciones educativas rurales que se encuentran en la zona de mayor interés para el desarrollo del proyecto. Como se puede observar en el mapa, seis de estos siete establecimientos están en un área apta para la implementación del sistema renovable, y de ellos se seleccionó la IED La Revuelta, sede San Rafael, debido a la facilidad para adelantar el proyecto en sus instalaciones y al compromiso de los directivos, los docentes y los estudiantes con la operación y el mantenimiento de estos equipos a largo plazo. Las zonas rojas y naranjas no son aptas para la instalación de este tipo de sistemas.

Figura 19. Mapa de idoneidad para la instalación de sistemas híbridos



Fuente: elaboración propia con base en Olivero-Ortiz *et al.* (2021).

Implementación del sistema híbrido solar-eólico

Luego de seleccionar la IED La Revuelta, sede San Rafael, para la intervención tecnológica, se procedió con el proceso de dimensionamiento e instalación del sistema híbrido solar-eólico en sus instalaciones (Figura 20). Como se señaló, este dispositivo fue contemplado para suministrar la energía necesaria a la PTAP, luminarias, cargadores de celulares, nevera para conservación de alimentos y equipos de comunicaciones.

En la Figura 21 se muestran algunas fotografías de los elementos del sistema instalado en la IED, en un espacio cerrado y protegido de la intemperie que fue facilitado por los directivos de la escuela. Se pueden observar los módulos solares, el aerogenerador, las baterías, los controladores MPPT, el inversor y las protecciones.

Figura 20. Diagrama de bloques del sistema híbrido



Fuente: elaboración propia a partir de montaje en campo.

Figura 21. Sistema híbrido implementado en la IED La Revuelta, sede San Rafael



Fuente: elaboración propia a partir de montaje en campo.

Resultados del diagnóstico ambiental

El diagnóstico ambiental permitió identificar que en la zona no se presta el servicio de acueducto; por lo tanto, a la institución le suministran agua no tratada de un acueducto comunitario abastecido por el río Piedras. Esto, sin embargo, trae consigo problemas como turbiedad en el agua durante épocas de lluvia y fallas en el servicio cuando hay sequía.

En la zona se encuentra el bioma selva húmeda tropical, que se corresponde con lugares lluviosos y precipitaciones entre 1.500-11.000 mm por año. Los árboles son de fuste alto y tienen una composición florística diversa. Además, este es el bioma con mayor predominancia en el país. En cuanto a áreas protegidas, las veredas y los centros poblados donde se encuentra la IED La Revuelta están por fuera del terreno de estas reservas; las más cercanas son las de parques nacionales naturales como el Sierra Nevada y el Tayrona. Aun así, en el sector intervenido se presentan áreas de bosques que tienen cobertura vegetal natural a lo largo de la cuenca del río Piedras, cuya importancia ambiental radica en que actúan como sumideros de carbono y controlan la erosión. El estado de este medio biótico, así como del abiótico y socioeconómico del lugar, se pudo determinar también según el diagnóstico realizado por el equipo de trabajo. De igual modo, se propusieron estrategias que fueron socializadas con los miembros de la comunidad académica (Tabla 8).

Tabla 8. Resultados y estrategias del análisis de los medios abiótico, biótico y socioeconómico

Medios	Abiótico	Biótico	Socioeconómico
Estado	Severo debido al impacto de actividades antrópicas y al empeoramiento de fenómenos como el cambio climático, El Niño y La Niña, que modifican las características físicas y químicas de los componentes agua y suelo.	Moderado, afectado por actividades como la deforestación y la contaminación, que reducen la salud y la biodiversidad de los ecosistemas.	Bajo, aunque tiene impacto como resultado de la baja cobertura en servicios de salud y saneamiento, lo que afecta directamente la calidad de vida de la población.
Estrategias	Uso de tecnologías verdes y renovables. Mayor gestión en la prevención y mitigación de desastres.	Educación ambiental y uso sostenible de recursos naturales.	Mejorar en la prevención de riesgos ambientales y ampliar la cobertura de servicios de saneamiento.

Luego de la caracterización inicial, se realizó un diagnóstico participativo en el que se determinaron las falencias que tiene la gestión ambiental en la institución, así como las fortalezas y las posibilidades de mejora. Esta evaluación se estructuró en la matriz de debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas (DOFA) que se muestra en detalle en la Tabla 9.

Tabla 9. Matriz DOFA del diagnóstico ambiental

Debilidades	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> • Mala calidad del agua. • Inexistencia de sistema de tratamiento para el agua potable. • El suministro de agua proviene de captaciones informales al río cercano. 	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de tecnologías renovables y verdes. • Implementación de sistemas de tratamiento. • Enseñanza sobre el desarrollo sostenible. • Participación activa de la comunidad.
Fortalezas	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> • Suministro de agua constante. • Infraestructura nueva en la IED La Revuelta, sede Santa Rafael. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de cargas contaminantes del afluente cercano. • En época de sequías, no se garantiza cobertura de agua al sector.

Calidad del agua y planta de tratamiento

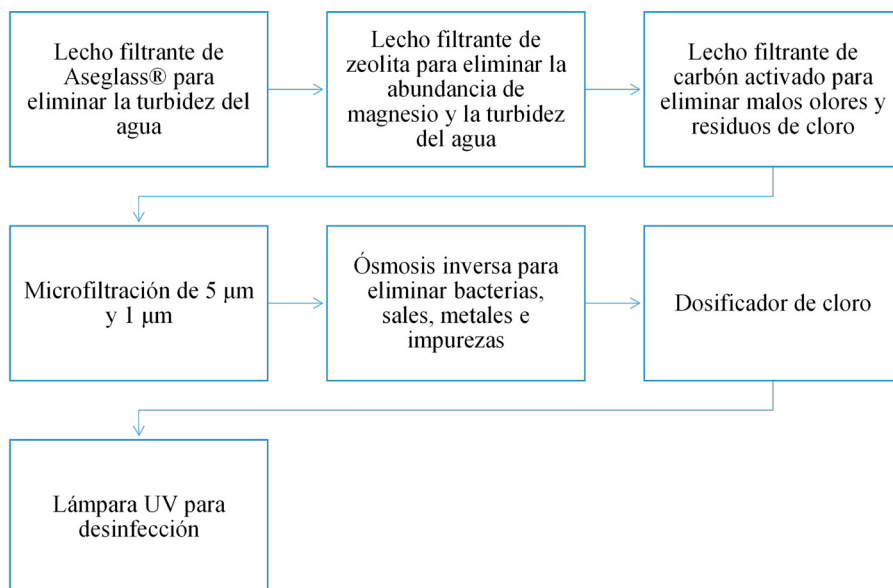
Como se indicó más arriba, antes de la implementación de la PTAP se realizó un análisis preliminar de la calidad del agua en dos épocas (lluvia y sequía), en las cuatro sedes de la IED La Revuelta, incluida la de San Rafael, objeto de la intervención tecnológica. Al respecto, es importante resaltar que, si bien la instalación se realizó en esta última sede, también impacta en las demás. En la Tabla 10 se muestran los resultados promedios que se obtuvieron en los laboratorios de la Universidad del Magdalena.

Como se puede apreciar, el pH, la conductividad y la turbiedad son adecuados como parámetros para consumo humano de conformidad con la Resolución 2115 de 2007. No obstante, la presencia de coliformes totales y de *E. coli* en todas las sedes analizadas indica que el agua de la que disponen cuenta con estos microorganismos considerados patógenos e indicadores de contaminación fecal. Teniendo en cuenta que el agua no debe generar ninguna afectación a la salud de la población objetivo, es necesario adelantar acciones para remover estos organismos del agua antes de su uso final. Por otro lado, la conductividad por debajo de 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ muestra menores valores de sólidos disueltos totales con reducción de minerales en el agua.

Tabla 10. Resultados del análisis preliminar de la calidad del agua de la IED La Revuelta en cuatro sedes objeto de intervención tecnológica

Colegios	pH	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Turbiedad (UNT)	Coliformes totales (UFC/100 cm^3)	E. coli (UFC/100 cm^3)
Máx. (Res. 2115 de 2007)	6,5-9,0	1.000	2	0	0
Sede México	8,37	207	0,82	Mayor a 100	76
Sede Calabazo	7,84	143,5	1,23	Mayor a 100	Mayor a 100
Sede principal	7,87	133,5	0,89	Mayor a 100	72
Sede San Rafael	7,28	168,7	0,48	122	28

Luego de tener claridad del estado del agua, y con el fin de prever cualquier contratiempo con la calidad del agua, se procedió a diseñar e instalar la PTAP. Para esta se contemplaron siete etapas de filtrado, con capacidad para producir 7 l/min, equivalentes a 420 l/hora. La Figura 22 muestra las etapas implementadas en este proceso.

Figura 22. Etapas de la PTAP en la IED La Revuelta

En la Figura 23 se puede observar la PTAP implementada, la cual se encuentra completamente energizada con el sistema solar-eólico, por lo que no representa ningún incremento en el consumo energético de la institución educativa. Además, es de anotar que se instaló

un tanque de almacenamiento de 1.000 l antes de la PTAP, debido al nivel de turbiedad del agua captada del río.

Luego de la implementación de la PTAP se analizaron en laboratorio las muestras de agua para evaluar de alguna manera la operación de la planta. Nuevamente, estas se procesaron en los laboratorios de la Universidad del Magdalena y se revisaron algunos parámetros esenciales, cuyos resultados se muestran en la Tabla 11. Estos datos reflejan la mejora en la calidad del agua en comparación con los de la Tabla 10, donde se evidenció alta presencia de coliformes totales. Así, luego del paso del agua por la planta de tratamiento, el pH se acercó a la neutralidad y la presencia de coliformes totales y fecales fue nula, lo que evidencia que es agua apta para el consumo humano sin restricción alguna.

Figura 23. PTAP implementada en la IED La Revuelta, sede San Rafael (420 l/hora)



Fuente: Carlos Robles.

Tabla 11. Resultados de la calidad del agua de la PTAP en la sede San Rafael

Colegios	pH	Conductividad (μS/cm)	Turbiedad (UNT)	Coliformes totales (UFC/100 cm ³)	<i>E. coli</i> (UFC/100 cm ³)
Máx. (Res. 2115 de 2007)	6,5-9,0	1.000	2	0	0
Sede San Rafael	6,78	15,3	0,25	0	0

Resultados de las capacitaciones

Las capacitaciones se realizaron con los miembros de la comunidad académica seleccionados por los directivos según su compromiso con el proyecto y con el fin de presentarlos como agentes multiplicadores del conocimiento ante los demás miembros de la IED La Revuelta. Fueron, en total, cuatro encuentros orientados a la gestión del recurso hídrico y a la operación y el mantenimiento del sistema híbrido solar-eólico y de la planta de tratamiento de agua potable. Adicionalmente, a todos los participantes se les capacitó en el dimensionamiento de sistemas solares fotovoltaicos y eólicos en busca de incentivar la utilización de este tipo de tecnologías en esta población.

Todas las capacitaciones fueron desarrolladas en las instalaciones de la sede San Rafael por estudiantes y docentes de los programas de Ingeniería Electrónica e Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad del Magdalena. En la Foto 11 se observan los asistentes a la primera jornada, relacionada con la apropiación y el conocimiento técnico de todos los componentes del proyecto.

Foto 11. Capacitaciones a la comunidad académica de la sede San Rafael



Fuente: Carlos Robles.

Figura 24. Resultados de la encuesta (preguntas 1-8)



Una vez finalizadas todas las capacitaciones, se realizó la encuesta de percepción con las ocho preguntas cerradas y una abierta. El instrumento fue aplicado a un directivo, un docente y 18 estudiantes de la comunidad académica que recibieron las capacitaciones y que desde el inicio de la intervención participaron en todos los procesos. Las respuestas a las preguntas cerradas que se muestran en la Figura 24 dan cuenta de un alto grado de aceptación de los miembros de la IED respecto a la pertinencia y la calidad de las capacitaciones y la importancia del proyecto.

La pregunta abierta, por su parte, se formuló en los siguientes términos: «¿Tiene alguna sugerencia o comentario relacionado con las capacitaciones o los sistemas instalados en la institución educativa?». En este caso, en general, se recibieron comentarios de aceptación del proyecto y de la necesidad de replicarlo en las demás instituciones educativas de la región.

Conclusiones

Luego de finalizar con este trabajo de impacto social, académico e investigativo, se puede resaltar la importancia de realizar intervenciones tecnológicas en las instituciones educativas ubicadas en las zonas rurales del distrito de Santa Marta, en las estribaciones de la SNSM. La implementación de la PTAP y del sistema de generación híbrido solar-eólico, en particular, permitió dotar a la IED La Revuelta, sede San Rafael, de tecnología de punta para el servicio de toda la comunidad académica. Así, con la planta de tratamiento de agua, se ven beneficiados los estudiantes, los docentes y los administrativos que antes no contaban con este tipo de servicio y en muchas ocasiones se veían en la necesidad de consumir agua no apta para el consumo humano.

Con las capacitaciones realizadas también se logró una adecuada transferencia del conocimiento respecto al funcionamiento y el mantenimiento de la PTAP y del sistema híbrido, con el fin de garantizar su continuidad y correcta operación en el tiempo. De este modo, los equipos quedaron a cargo de la IED La Revuelta, que se encargará de la operación y el mantenimiento de estos, reflejando el compromiso y sentido de pertenencia con el proyecto.

Es indudable la asociación directa entre la calidad del agua y el bienestar humano. En este apartado se evidenció que, si bien la zona intervenida no carecía del recurso, el que usaba no era apto para el consumo humano al presentar contaminantes como bacterias fecales por encima de los límites permitidos. En esa medida, era preciso recurrir a la tecnología para mejorar la calidad del agua, minimizando a su vez los daños a los ecosistemas.

Por último, los resultados de la encuesta de percepción demuestran el grado de satisfacción de estudiantes y docentes con todo el proyecto, y al mismo tiempo reflejan la necesidad de seguir trabajando para brindar soluciones a las problemáticas que aquejan a las instituciones educativas rurales de la SNSM. En este aspecto cobra relevancia uno de los hallazgos de esta intervención: el mapa de idoneidad para la instalación de sistemas híbridos solares-eólicos en las zonas aptas, que proporciona una hoja de ruta de sectores que se

pueden intervenir, garantizando la correcta operación de los componentes solares y eólicos como alternativa tecnológica amigable con el ambiente en la SNSM.

Referencias

- Ali, S., Taweekun, J., Techato, K., Waewsak, J. y Gyawali, S. (2019). GIS based site suitability assessment for wind and solar farms in Songkhla, Thailand. *Renewable Energy*, 132, 1360-1372. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.035>
- Álvarez, L., Cantillo, K., Rico, K. y Salazar, A. (2013). Acceso y calidad del agua para el consumo humano en Santa Marta como indicador de inequidad en salud. *Universidad y Salud*, 15(2), 113-122. www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072013000200003&lng=en&tlng=es
- Anwarzai, M. y Nagasaka, K. (2017). Utility-scale implementable potential of wind and solar energies for Afghanistan using GIS multi-criteria decision analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 150-160. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.048>
- Balestrini, M. (2006). *Cómo se elabora el proyecto de investigación*. BL Consultores Asociados.
- Cabrera, A. y Fernández, E. (2020). *Apoyo a las actividades de implementación del sistema de generación híbrido solar-eólico en la IED la Revuelta [Tesis de pregrado, Universidad del Magdalena]*. Archivo digital. <http://repositorio.unimagdalena.edu.co/handle/123456789/5471>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C. y Baptista, M. D. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
- Infobae (2022, 8 de marzo). 17 departamentos del país presentan problemas en la gestión de los planes de agua. <https://www.infobae.com/america/colombia/2022/03/08/17-departamentos-del-pais-presentan-problemas-en-la-gestion-de-los-planes-de-agua/>
- IRENA (2022). *Renewables 2022: Global Status Report*. IRENA. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf
- La Voz de Chile (2023). *Energía renovable 2023, estos 8 países superaron promedio*. <https://lavozdechile.com/energia-renovable-2023-estos-8-paises-superaron-promedio/>
- Lipps, W. C., Braun-Howland, E. B. y Baxter, T. E. (Eds.). (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23.ª ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Olivero-Ortiz, V., Robles-Algarín, C. y Vilorio-Porto, J. (2021). An AHP-GIS Based Approach for Site Suitability Analysis of Solar-Wind Projects in Santa Marta, Colombia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11(5), 211-223. <https://econjournals.com/index.php/ijee/article/view/11266>
- Pinilla, Á. (2016). Soluciones energéticas para zonas rurales (¿En el posconflicto?). *Revista de Ingeniería*, (44), 36-39. <https://doi.org/10.16924/revinge.44.5>
- Robles-Algarín, C. y Rodríguez Álvarez, O. (2018). Un panorama de las energías renovables en el mundo, Latinoamérica y Colombia. *Espacios*, 39(34), 10.
- Robles-Algarín, C., Polo, A. y Ospino-Castro, A. (2017). An Analytic Hierarchy Process Based Approach for Evaluating Renewable Energy Sources. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7(4), 38-47.

- Rodríguez Miranda, J. P., García-Ubaque, C. A. y García-Ubaque, J. C. (2016). *Enfermedades transmitidas por el agua y saneamiento básico en Colombia*. *Revista de Salud Pública*, 18(5), 738-745. <https://doi.org/10.15446/rsap.v18n5.54869>
- SIEL (2016). *Sistema de Información Eléctrico Colombiano*. Consultado el 17 de noviembre de 2022. <http://www.siel.gov.co/Inicio/Distribucion/tabid/58/Default.aspx>
- Unicef (s. f.). *La juventud en favor de la acción climática*. <https://www.unicef.org/es/medio-ambiente-cambio-climatico/juventud-accion>

Los Autores

Sonia Esperanza Aguirre Forero. Ingeniera agrónoma de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Magister en Manejo y Conservación de Suelos y Aguas. Doctora en Ciencias Agrarias, énfasis Suelos, de la Universidad Nacional de Colombia. Docente Titular de la Universidad del Magdalena, adscrita a la Facultad de Ingeniería. Correo electrónico: saguirre@unimagdalena.edu.co, ORCID: 0000-0002-6975-1940

Nelson Virgilio Piraneque Gambasica. Ingeniero agrónomo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica e Colombia. Especialista en Manejo Biológico de Cultivos. Doctor en Ciencias Agrarias, énfasis Suelos, de la Universidad Nacional de Colombia. Docente Titular Universidad del Magdalena, adscrito a la Facultad de Ingeniería. Líder del Grupo de Investigación Suelo, Ambiente y Sociedad. Correo electrónico: npiraneque@unimagdalena.edu.co, ORCID: 0000-0002-4264-9428

Carlos Arturo Robles Algarín. Ingeniero Electrónico. Magister en Ingeniería de Control y Automatización de Procesos. Doctor en Gestión Tecnológica. Docente Titular del Programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Magdalena. Líder del Grupo de Investigación Magma Ingeniería. Es autor de numerosas publicaciones científicas enfocadas en sus áreas de investigación, relacionadas con los sistemas de control, diseño de sistemas electrónicos y energía solar fotovoltaica. Correo electrónico: croblesa@unimagdalena.edu.co, ORCID: 0000-0002-5879-5243