

Gestión ^{de} recursos hídricos y energéticos

Contribuciones desde la academia



Editora académica
Andrea Carolina Sánchez Díaz

POLI
POLITÉCNICO
GRANCOLOMBIANO
INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA

Gestión ^{de} recursos hídricos ^y energéticos

Contribuciones desde la academia

Editora académica

Andrea Carolina Sánchez Díaz

Gestión de recursos hídricos y energéticos: contribuciones desde la academia / Andrea Carolina Sánchez Díaz, editora académica- Bogotá D.C.: Editorial Politécnico Grancolombiano., 2026.

137 p.: il; col., 16x23 cm.

Incluye referencias bibliográficas.

ISBN: 978-628-7840-41-6

1. Metodología de la investigación. 2. Investigación energética 3. Legislación ambiental y energética 4. Innovación y economía circular -- Investigaciones I. Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano II. Tít.

SCDD 338.927

Co-BoIUP

Sistema Nacional de Bibliotecas - SISNAB
Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano.

Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano

Calle 61 N.º 7 - 69

Tel.: 7455555, ext. 1516

Bogotá, Colombia

© 2026. Todos los derechos reservados.

Primera edición, julio de 2026

Gestión de recursos hídricos y energéticos.

Contribuciones desde la academia

eISBN: 978-628-7840-41-6

Editora académica

Andrea Carolina Sánchez Díaz

Coautores

Andrea Carolina Sánchez Díaz

Álvaro Iván Méndez Acuña

Gerardo Gordillo Guzmán

Julián Camilo Peña Bermúdez

Laura Mercedes Arteaga Rojas

José David Roncancio Barragán

Víctor Antonio Haché Pepén

Christian Alejandro Bastidas Medina

Juan David Romero Salazar

Liliana Medina Campos

Nelson Andrés Martínez Marín

Sergio Alfonso Ballén Zamora

Wilmer Montes Martínez

Diana Marcela Rodríguez Rodríguez

Carlos Andrés Morales Suárez

Zahira Valeria Poloche Torres

Michele Ando Ortiz

Ana María Orjuela Méndez

Jessica Adhelaída Arredondo Martínez

Alfredo Bustamante Avendaño

Ramón Gabriel Aguilar Vega

Equipo editorial

Director editorial

Guillermo A. González T.

Analista de producción editorial

Mónica Quintana Rey

Corrección de estilo

Hernán Darío Cadena

Diseño y diagramación

Nancy Patricia Cortés Cortés

Diseño de portada

Daniel Bosiga Garzón

¿Cómo citar este libro?

Sánchez Díaz, A.C. (2026). *Gestión de recursos hídricos y energéticos. Contribuciones desde la academia*. Politécnico Grancolombiano.

No se permite la reproducción total o parcial de esta obra, ni su incorporación a un sistema informático, ni su tratamiento en cualquier forma o medio existentes o por existir, sin el permiso previo y por escrito de la Editorial de la Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano. Para usos académicos y científicos, la Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano accede al licenciamiento *Creative Commons* del contenido de la obra con: Atribución - No comercial - Compartir igual.



El contenido de esta publicación se puede citar o reproducir con propósitos académicos siempre y cuando se indique la fuente o procedencia. Las opiniones expresadas son responsabilidad exclusiva del (los) autor(es) y no constituye una postura institucional al respecto.

La Editorial de la Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano pertenece a la ASEUC (Asociación de Editoriales Universitarias de Colombia).

El proceso de gestión editorial y visibilidad de las publicaciones de la Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano se encuentra certificado bajo los estándares de la norma ISO 9001:2015, con el código de certificación ICONTEC SC-CER660310.

Contenido

Introducción

5

1 | Estrategias didácticas para la enseñanza de circuitos eléctricos y su aplicación en la eficiencia energética

Teaching Strategies for Teaching Electrical Circuits and their Application in Energy Efficiency

7

2 | Uso de LabVIEW en la síntesis de materiales para la fabricación de celdas solares

Use of LabVIEW in the Synthesis of Materials for the Manufacture of Solar Cells

21

3 | Obtención de carbón activado a partir del bagazo cervecero como estrategia de reducción de residuos sólidos enfocado hacia la economía circular

Obtaining Activated Carbon from Brewery Waste as a Strategy for Reducing Solid Waste with a Focus on the Circular Economy

43

4 | El futuro de las centrales minihidráulicas

The Future of Mini-Hydraulic Power Plants

61

5 | Análisis multitemporal de los índices vegetativos e hidrológicos de los dos sistemas de abastecimiento de agua de la ciudad de Bogotá

Multitemporal Analysis of Vegetation and Hydrological Indices of the two Water Supply Systems in the City of Bogotá

79

6 | Métricas de eficiencia energética e hídrica en colegios públicos K-12 de la ciudad de Barranquilla: evaluación para toma de decisiones frente a los ODS

Energy and Water Efficiency Metrics in Public K-12 Schools in the city of Barranquilla: Evaluation for Decision-Making in Relation to the SDGs

101

7 | Hacia un futuro sostenible: análisis de las iniciativas ambientales en la reducción de emisiones, Sonora-México

Towards a Sustainable Future: Analysis of Environmental Initiatives in Emissions Reduction, Sonora, Mexico

117

Andrea Carolina Sánchez Díaz¹

De acuerdo con el Foro Económico Mundial, la escasez de recursos se posiciona como uno de los principales riesgos a nivel global, ubicándose entre los más severos en un horizonte de diez años (WEF, 2025). Este escenario se ve reforzado por el crecimiento constante de la demanda energética y por la presión internacional para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen directamente al calentamiento global. A pesar de los compromisos asumidos por distintos países, el sector energético continúa siendo uno de los principales responsables de dichas emisiones, lo que pone en evidencia que aún existen retos importantes por enfrentar para el cumplimiento de las metas establecidas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (IPCC, 2023).

En este contexto, marcado por la necesidad de transformar la manera en que se gestionan los recursos hídricos y energéticos, se realizó, en noviembre de 2024, la primera versión del Congreso Internacional de Escasez Hídrica y Recursos Energéticos, realizado en el Politécnico Grancolombiano, en la ciudad de Bogotá. Este evento se concibió como un espacio de encuentro académico y científico en el que se manifestó un interés común por analizar estas problemáticas desde diferentes enfoques y por aportar, desde el trabajo investigativo, alternativas que contribuyan a la búsqueda de soluciones frente a desafíos de alcance local, nacional e internacional.

¹ Politécnico Grancolombiano.

El presente libro recoge una selección de trabajos presentados en el marco de este congreso, en los cuales investigadores comparten los resultados de sus contribuciones al conocimiento y a la ciencia, en diálogo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Las experiencias aquí reunidas reflejan el papel de la academia no solo como generadora de conocimiento, sino también como actor clave en la formación de capacidades, el desarrollo tecnológico y la comprensión de las dinámicas ambientales y energéticas contemporáneas.

La lectura del libro propone un recorrido que inicia con la reflexión sobre cómo se forma el conocimiento y cómo se desarrollan tecnologías desde el ámbito académico para abordar los retos energéticos y ambientales actuales. Posteriormente, se analizan las relaciones entre la energía y el agua en el territorio, considerando cómo estas interacciones condicionan la sostenibilidad de los sistemas naturales y sociales, tanto desde una perspectiva nacional como a partir de experiencias desarrolladas en otros contextos. Finalmente, se abordan investigaciones orientadas a la gestión y evaluación de soluciones energéticas y ambientales, en las que la medición, el uso de indicadores y la toma de decisiones informadas adquieren un papel central en los procesos de planificación y transición hacia modelos más sostenibles.

En conjunto, los capítulos que conforman este libro permiten comprender cómo, desde distintos enfoques y escalas, la academia aporta a la discusión y búsqueda de soluciones frente a la escasez hídrica y los retos energéticos actuales. Más que presentar respuestas cerradas, las contribuciones aquí reunidas invitan a reflexionar sobre la necesidad de articular formación, investigación y gestión como parte de los procesos que buscan avanzar hacia modelos de desarrollo más sostenibles.

Referencias

World Economic Forum. (2025). *The Global Risks Report 2025* (20th ed.). World Economic Forum. Recuperado de <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2025/>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

Capítulo 1

ESTRATEGIAS DIDÁCTICAS PARA LA ENSEÑANZA DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS Y SU APLICACIÓN EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

*Teaching Strategies for Teaching
Electrical Circuits and their Application
in Energy Efficiency*

Christian Alejandro Bastidas Medina
Politécnico Grancolombiano

Juan David Romero Salazar
Politécnico Grancolombiano

Resumen

Este capítulo presenta el diseño e implementación de una estrategia didáctica para la enseñanza de circuitos eléctricos en estudiantes de ingeniería, integrando actividades experimentales, simulaciones digitales y recursos de laboratorio. La estrategia se orienta a mejorar la comprensión de conceptos fundamentales de la física eléctrica, como la Ley de Ohm, las Leyes de Kirchhoff y los circuitos RC, y a fortalecer su aplicación en contextos relacionados con las energías limpias y la eficiencia energética. La metodología empleada combina talleres experimentales, herramientas digitales y evaluaciones pre y post intervención, cuyos resultados evidencian mejoras en la comprensión conceptual, la integración entre teoría y práctica y la motivación de los estudiantes hacia el aprendizaje de la física eléctrica.

Introducción

La transición hacia modelos energéticos sostenibles exige una comprensión profunda de los principios fundamentales de la física eléctrica y su aplicación en tecnologías renovables. Este capítulo aborda el diseño e implementación de una estrategia didáctica que integra herramientas digitales y actividades experimentales para mejorar la enseñanza de circuitos eléctricos. Se centra en conceptos como la Ley de Ohm, las Leyes de Kirchhoff y los circuitos RC, vinculándolos con aplicaciones en eficiencia energética.

La física eléctrica es un área fundamental en la formación de ingenieros, especialmente en el contexto actual de transición energética y sostenibilidad. Sin embargo, los estudiantes suelen enfrentar dificultades en conceptos abstractos como la Ley de Ohm y las Leyes de Kirchhoff. Estos desafíos se atribuyen a métodos de enseñanza convencionales que no logran conectar eficazmente teoría y práctica.

La enseñanza y el aprendizaje del electromagnetismo ha sido objeto de múltiples estudios en la Investigación en Educación en Ciencias Física (Jelicic et al., 2017; Suárez et al., 2023). Sin embargo, la atribución de relaciones causales entre campos electromagnéticos y la dificultad para identificar la

naturaleza de sus fuentes siguen proponiendo desafíos sobre la comprensión de los fenómenos electromagnéticos (Suárez et al., 2023). De hecho, la investigación sobre las dificultades de los estudiantes de secundaria y universitarios para comprender e implementar las leyes de Maxwell ha demostrado que un porcentaje significativo de estudiantes confía en conceptos erróneos (Suárez et al., 2023). Este pobre progreso en el aprendizaje se ha atribuido a diferentes factores, incluida la naturaleza de la enseñanza de las ciencias convencional y las dificultades que impiden un mejor aprendizaje de las teorías científicas (Suárez et al., 2023).

El rápido desarrollo tecnológico y los cambios en la economía y el mercado laboral significan que la educación debe adaptarse a nuevas condiciones y expectativas (Schnider et al., 2024). En ese sentido, es indispensable complementar los métodos de enseñanza tradicional en física con actividades orientadas a la práctica. A través de las actividades experimentales, los estudiantes adquieren conocimiento práctico y competencias que fortalecen sus conocimientos. Para ilustrar, Schnider et al. (2024) proponen una estrategia didáctica que usa microcontroladores de Arduino para desarrollar experimentos enfocados al mejoramiento en la comprensión de conceptos relativos a corriente directa, resistencia, conductancia, circuitos eléctricos y ley de Ohm. Por otra parte, Dvořák et al. (2024) desarrollan una estrategia de formación en electricidad y magnetismo, para docentes, que permite mejorar la comprensión conceptual en los estudiantes. Los temas en las lecturas asociadas a la formación se desarrollan con base en experimentos escolares que contrastan la parte teórica (esquemas representativos y modelos matemáticos) con los montajes experimentales asociados (Dvořák et al., 2024).

La relevancia de esta investigación se extiende más allá del ámbito académico, contribuyendo a la formación de profesionales preparados para enfrentar los desafíos energéticos del siglo XXI. Al vincular los conceptos fundamentales de la física eléctrica con aplicaciones en energías renovables y eficiencia energética, el proyecto busca no solo mejorar la comprensión de los estudiantes, sino también fomentar su interés en el desarrollo de soluciones sostenibles.

En los siguientes apartados se detallará la metodología empleada, los resultados obtenidos y las implicaciones para la práctica educativa en el campo de la física eléctrica. Se prestará especial atención a cómo la integración de diferentes herramientas y enfoques puede mejorar la comprensión de

conceptos fundamentales y su aplicación en contextos prácticos relacionados con la sostenibilidad energética.

Desafíos en la enseñanza de la física eléctrica y su vínculo con la eficiencia energética

Aunque en la actualidad se han desarrollado diversos recursos educativos y herramientas tecnológicas que han facilitado los procesos de enseñanza y aprendizaje en la comprensión dinámica de los fenómenos físicos en el aula, estas innovaciones también generan nuevas destrezas y situaciones que deben ser abordadas bajo ciertos requerimientos. Por lo tanto, es fundamental determinar qué herramientas emplear y cuándo aplicar la actividad adecuada para enseñar física eléctrica a los estudiantes del Politécnico Grancolombiano, tanto en el aula como en el laboratorio. En el aula, los estudiantes del Politécnico Grancolombiano han mostrado dificultades para entender y aplicar conceptos como las leyes de Ohm y la resistividad eléctrica. Esto subraya la necesidad de delimitar la aplicación de las herramientas necesarias para superar estas dificultades. Además, es importante que las temáticas se enfoquen en una aplicación práctica o en un contexto que fortalezca el vínculo entre teoría y práctica. Por ello, el desarrollo de temas relacionados con la física eléctrica debe estar bien consolidado para conectar estos conocimientos con aplicaciones prácticas en el campo de las energías limpias y la eficiencia energética, áreas vitales en el contexto actual de cambio climático y búsqueda de sostenibilidad. Por consiguiente, es necesario consolidar una estrategia adaptada a las necesidades del proceso de enseñanza de la física eléctrica.

Esta estrategia debe integrar de manera efectiva actividades como herramientas digitales, recursos didácticos y laboratorios en un proceso formativo claro que no solo mejore la comprensión de conceptos físicos, sino que posibilite una conexión clara con aplicaciones en energías limpias y eficiencia energética, representando un desafío pedagógico significativo. De esta manera, se busca abordar esta problemática mediante el desarrollo y evaluación de un conjunto de talleres que utilicen herramientas de laboratorio y que integren de manera efectiva las herramientas digitales, recursos didácticos y el laboratorio.

Lo que se busca es que los estudiantes adquieran una comprensión profunda de los conceptos fundamentales de la física electromagnética, mientras se establece una conexión clara con su aplicación en el campo de las energías limpias y la eficiencia energética. Teniendo esto en cuenta, se formula la pregunta que centra la investigación: ¿Cómo aprovechar las herramientas digitales, los recursos didácticos, y la infraestructura de laboratorio de física para el desarrollo de un conjunto de talleres que permitan consolidar en los estudiantes la comprensión de los conceptos fundamentales de física electromagnética y su utilidad en el contexto de las energías limpias y la eficiencia energética?

En vista de la necesidad cada vez mayor del desarrollo de tecnologías que puedan implementarse en el contexto de las energías limpias y la eficiencia energética, se hace imprescindible la proposición de una estrategia que permita mejorar la comprensión de los conceptos y los fenómenos ligados a la física eléctrica y el magnetismo. Dicho enfoque debería conducir a una motivación en los estudiantes por el diseño, la construcción, y la implementación de dispositivos tecnológicos cada vez más eficaces. Aunque se considere el punto de partida para el desarrollo de gran parte de tecnologías como dispositivos semiconductores, discos magnéticos, átomos fríos, celdas fotovoltaicas y baterías, el estudio de la física electromagnética ha sido calificado como desafiante por parte de los estudiantes, ya que opinan que su formalismo es abstracto y poco intuitivo. En ese sentido, es menester el desarrollo de una estrategia didáctica que permita mejorar, mediante el uso de herramientas digitales y trabajo en laboratorio, la comprensión de los fenómenos físicos asociados a la física eléctrica y el magnetismo. Una mayor motivación de los estudiantes hacia los tópicos citados antes conduce a una voluntad más fortalecida por el desarrollo de tecnologías óptimas que puedan ser implementadas en el caso de las energías renovables y la eficiencia energética.

Metodología

Se implementó una metodología mixta en estudiantes del Politécnico Grancolombiano, combinando talleres experimentales, simuladores digitales como PhET y herramientas de análisis de datos. El enfoque incluyó cuatro fases: diagnóstico de preconceptos, diseño e implementación de talleres, evaluaciones pre y post taller, y análisis de resultados.

Este enfoque se justifica por la necesidad de integrar aspectos tanto cuantitativos como cualitativos, permitiendo una comprensión holística del fenómeno estudiado y el desarrollo de una solución práctica en forma de estrategia educativa.

La investigación se estructura en cuatro fases principales, diseñadas para abordar de manera sistemática los objetivos planteados:

Fases	Tareas
Diagnóstico y revisión de preconceptos	• Puesta en marcha de evaluación cuantitativa de los conocimientos previos de los estudiantes sobre fundamentos referentes a energía eléctrica y magnetismo. • Charlas semiestructuradas con muestra a estudiantes para comprender percepciones y dificultades en la conexión de conceptos.
Selección y desarrollo de la estrategia	Con base al diagnóstico, se formularán: • Talleres y desarrollo de simuladores. • Sesiones de resolución de problemas. • Proyectos prácticos de aplicación (medición de magnitudes).
Evaluación y toma de decisiones	Al momento de evaluar la estrategia, se tendrán en cuenta: • Aplicar una evaluación cuantitativa postimplementación para medir el progreso en la comprensión y aplicación de conceptos. • Realizar grupos focales con los estudiantes para obtener retroalimentación cualitativa sobre la efectividad de la estrategia.
Análisis de datos	• Revisión general y filtrado de datos. • Realizar análisis estadísticos de los datos cuantitativos (pre y post evaluaciones). • Efectuar análisis temáticos de los datos cualitativos (entrevistas y grupos focales) • Triangular los resultados cuantitativos y cualitativos.

Figura 1. Fases que componen la estrategia

Este diseño metodológico permite un enfoque dinámico, facilitando la refinación de las estrategias educativas a medida que se obtienen conclusiones. La integración de métodos cuantitativos y cualitativos facilita una evaluación robusta y multidimensional de la efectividad de las estrategias desarrolladas.

La articulación de estas fases con los objetivos del proyecto garantiza un abordaje sistemático y coherente, alineado con los principios de la metodología mixta y el paradigma pragmático. Este enfoque no solo permitirá el desarrollo de estrategias educativas efectivas, sino que además generará conocimientos sobre la pedagogía en el campo de la física electromagnética y la energía sostenible.

Planificación de la estrategia didáctica

Las actividades planteadas están sincronizadas con la programación académica del curso y las etapas de la investigación. Esta alineación temporal asegurará una implementación fluida y coherente de las estrategias educativas, maximizando su impacto en el proceso de aprendizaje de los estudiantes.

Finalmente, como etapa de cierre se establecen:

Análisis y obtención de resultados:

1. Integración de hallazgos:

Se realiza una síntesis comprehensiva de los datos cuantitativos y cualitativos recopilados.

2. Elaboración de informe:

El informe final está compuesto de:

- a. Descripción exhaustiva de las estrategias desarrolladas e implementadas.
- b. Análisis de los resultados obtenidos en las evaluaciones cuantitativas y cualitativas.
- c. Evaluación crítica de la efectividad de cada estrategia, respaldada por evidencia.
- d. Conjunto de recomendaciones fundamentadas para futuras implementaciones y mejoras potenciales.

Resultados de la implementación de la estrategia didáctica

En la estrategia presentada se obtuvieron resultados con ayuda de laboratorios experimentales y simuladores, promoviendo la comprensión dinámica y práctica de los fenómenos electromagnéticos. Además, se busca motivar a los estudiantes a explorar aplicaciones prácticas de estos conceptos en tecnologías limpias. Bajo esas condiciones se obtiene:

Mejora Conceptual

El análisis de las pruebas pre y post taller reveló un incremento promedio del 30% en la comprensión de conceptos fundamentales como la relación

entre corriente, voltaje y resistencia. Además, los estudiantes demostraron una mayor habilidad para aplicar las leyes de Kirchhoff en circuitos complejos, lo que evidencia un avance significativo en la comprensión teórico-práctica.

Integración Teórico-Práctica

El uso combinado de laboratorios experimentales y simulaciones digitales facilitó la visualización de fenómenos abstractos y permitió a los estudiantes establecer conexiones concretas entre teoría y práctica. Por ejemplo, los estudiantes identificaron cómo el comportamiento de un circuito RC se relaciona con el almacenamiento de energía en capacitores, un principio clave en tecnologías sostenibles.

Motivación y Percepción

Cuestionarios de retroalimentación indicaron que el 85% de los estudiantes se sintió más motivado a aprender conceptos de física eléctrica gracias a la metodología interactiva. Además, el 78% consideró que las actividades ayudaron a conectar mejor los temas vistos en clase con aplicaciones reales en eficiencia energética.

Impacto en la Resolución de Problemas

Los estudiantes demostraron un progreso notable en sus habilidades para resolver problemas prácticos, utilizando estrategias analíticas como el uso de gráficas y relaciones matemáticas. Este desarrollo se tradujo en una mayor confianza para abordar desafíos tecnológicos relacionados con la energía. Los talleres para esta estrategia incluyeron:

- Introducción teórica: explicación de conceptos clave.
- Montaje experimental: construcción de circuitos usando *protoboards* y dispositivos como multímetros.
- Análisis de datos: uso de Excel para graficar relaciones matemáticas entre magnitudes.
- Simulaciones digitales: uso del simulador PhET para contrastar resultados experimentales.

A continuación, se muestran tales procesos.

Experimento ley de Ohm

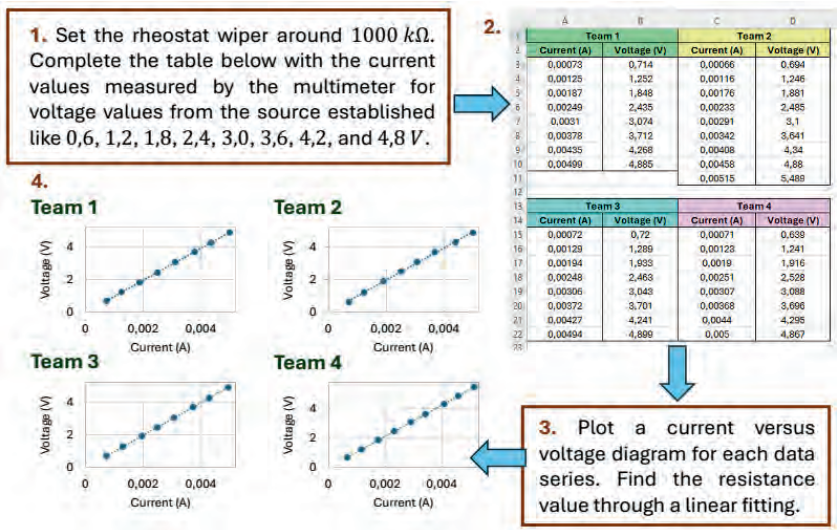


Figura 2. Gráficas de voltaje versus corriente eléctrica tomada por estudiantes

Nota: elaboración propia.

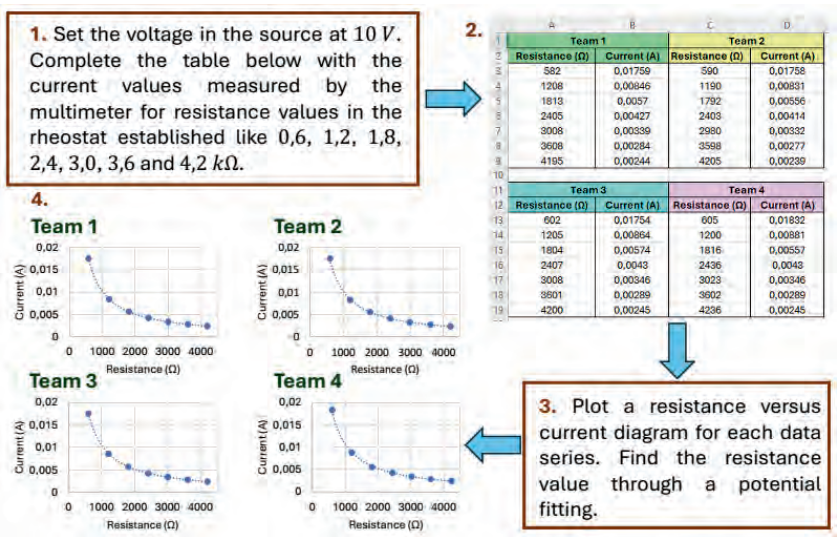


Figura 3. Gráficas de corrientes versus resistencia eléctrica tomada por estudiantes

Nota: elaboración propia.

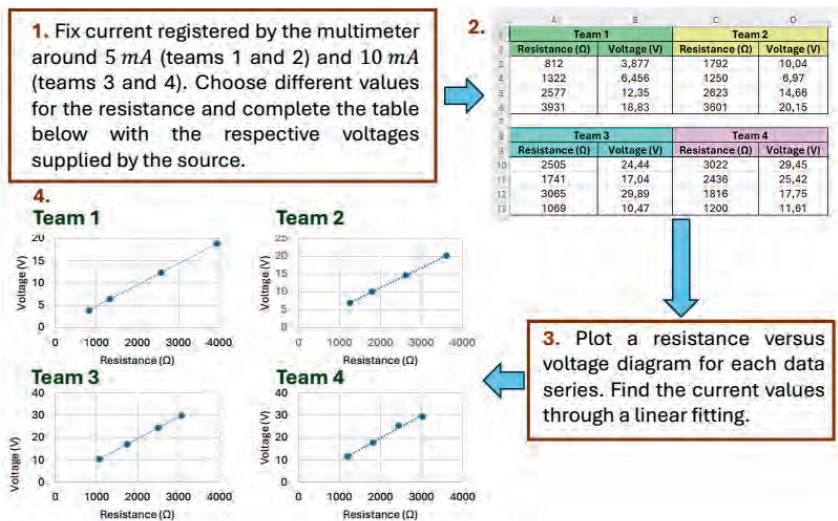


Figura 4. Gráficas de voltaje versus resistencia tomadas por estudiantes

Nota: elaboración propia.

Tabla 1. Resultados del ajuste aplicado a las series de datos ilustradas en las figuras 3-5.

Grupo	Figura		
	3	4	5
1	$y = 977,57x + 0,0168$ $R^2 = 0,9999$ Resistance: 977,57 Ω.	$y = 10,269x^{-1,0000}$ $R^2 = 1,0000$ Voltage: 10,269 V.	$y = 0,0048x + 0,0603$ $R^2 = 0,9999$ Current: 0,0048 A.
2	$y = 1064,9x + 0,0016$ $R^2 = 1,0000$ Resistance: 1064,9 Ω.	$y = 11,193x^{-1,0150}$ $R^2 = 0,9996$ Voltage: 11,193 V.	$y = 0,0056x - 0,0178$ $R^2 = 1,0000$ Current: 0,0056 A.
3	$y = 990,80x + 0,0094$ $R^2 = 1,0000$ Resistance: 990,80 Ω.	$y = 11,169x^{-1,0090}$ $R^2 = 1,0000$ Voltage: 11,169 V.	$y = 0,0097x + 0,0877$ $R^2 = 1,0000$ Current: 0,0097 A.
4	$y = 979,51x + 0,0289$ $R^2 = 0,9986$ Resistance: 979,51 Ω.	$y = 13,047x^{-1,0290}$ $R^2 = 0,9994$ Voltage: 13,047 V.	$y = 0,0101x - 0,2683$ $R^2 = 0,9896$ Current: 0,0101 A.

Nota: elaboración propia.

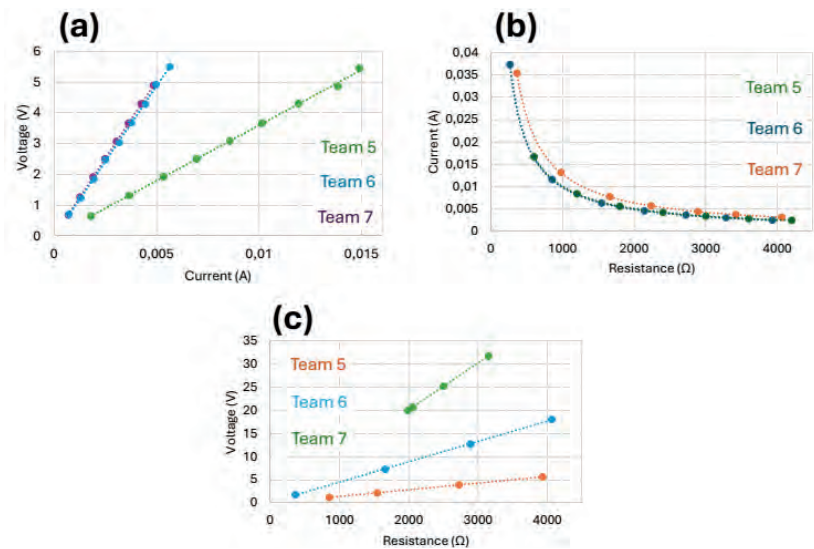


Figura 5. Mediciones tomadas por estudiantes acorde con la práctica de ley de Ohm

Nota: elaboración propia.

Tabla 2. Resultados del ajuste aplicado a las series de datos ilustradas en la figura 5.

Grupo	Figura		
	6-a	6-b	6-c
5	$y = 360,07x + 0,0054$ $R^2 = 0,9989$ Resistance: 360,07 Ω.	$y = 9,8976x^{-0,9980}$ $R^2 = 1,0000$ Voltage: 9,8976 V.	$y = 0,0014x - 0,0278$ $R^2 = 1,0000$ Current: 0,0014 A.
6	$y = 982,68x - 0,0205$ $R^2 = 0,9994$ Resistance: 982,68 Ω.	$y = 10,328x^{-1,0070}$ $R^2 = 1,0000$ Voltage: 10,328 V.	$y = 0,0044x + 0,1220$ $R^2 = 0,9997$ Current: 0,0044 A.
7	$y = 1013,3x + 0,0004$ $R^2 = 1,0000$ Resistance: 1013,3 Ω.	$y = 13,197x^{-1,0050}$ $R^2 = 1,0000$ Voltage: 13,197 V.	$y = 0,0101x - 0,0560$ $R^2 = 1,0000$ Current: 0,0101 A.

Nota: elaboración propia.

Conclusiones

Para mejorar la comprensión de los conceptos relativos a la ley de Ohm y la resistividad eléctrica en los estudiantes de Ingeniería del Politécnico

Grancolombiano, se desarrolló e implementó una estrategia didáctica basada en recursos educativos y herramientas tecnológicas actuales. Esta estrategia integró actividades experimentales y simulaciones digitales, logrando avances significativos en la comprensión de conceptos eléctricos complejos y su conexión con aplicaciones prácticas en eficiencia energética.

El trabajo de laboratorio, estructurado mediante guías detalladas, permitió a los estudiantes identificar dispositivos experimentales, analizar ecuaciones clave y correlacionar magnitudes físicas mediante gráficos elaborados en herramientas digitales como Excel. Estas prácticas facilitaron una comprensión aplicada de fenómenos como la ley de Ohm macroscópica, las leyes de Kirchhoff y los circuitos RC, fomentando habilidades analíticas y técnicas esenciales para su desarrollo académico y profesional.

El uso del simulador PhET, producido por la Universidad de Colorado, complementó las actividades experimentales al permitir a los estudiantes contrastar resultados teóricos con simulaciones interactivas, fortaleciendo la comprensión de los fenómenos electromagnéticos. Este enfoque integrador promovió el aprendizaje colaborativo y facilitó una conexión significativa entre teoría y práctica, motivando a los estudiantes hacia temas de sostenibilidad energética.

Esta estrategia, además de mejorar la comprensión académica, tiene el potencial de formar profesionales capaces de abordar desafíos locales, nacionales y globales relacionados con el cambio climático y la transición energética. Su implementación demuestra que la educación científica práctica y contextualizada es fundamental para fomentar soluciones innovadoras en tecnologías limpias, subrayando la necesidad de reforzar este enfoque con herramientas de evaluación más robustas y proyectos interdisciplinarios.

Referencias

Dvořák, L., Dvořáková, I., Koudelková, V., & Gottwald, S. (2024, abril). Experiments in electricity and magnetism for future teachers: From lectures to teaching labs. *Journal of Physics: Conference Series*, 2750(1), 012015. IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2750/1/012015/meta>

- Jelicic, K., Planinic, M., & Planinsic, G. (2017). Analyzing high school students' reasoning about electromagnetic induction. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 010112. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010112>
- Schnider, D., & Hömöstrei, M. (2024). Classroom experimentation-Arduino projects to teach electromagnetism. En *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2693, No. 1, p. 012015). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2693/1/012015/meta>
- Suárez, Á., Martí, A. C., Zuza, K., & Guisasola, J. (2023). Electromagnetic field presented in introductory physics textbooks and consequences for its teaching. *Physical Review Physics Education Research*, 19(2), 020113. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.020113>

Capítulo 2

USO DE *LabVIEW* EN LA SÍNTESIS DE MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE CELDAS SOLARES

*Use of LabVIEW in the Synthesis of Materials
for the Manufacture of Solar Cells*

Álvaro Iván Méndez Acuña

*Grupo de Materiales Semiconductores y Energía
Solar – Universidad Nacional de Colombia*

Gerardo Gordillo Guzmán

*Grupo de Materiales Semiconductores y Energía
Solar – Universidad Nacional de Colombia*

Julián Camilo Peña Bermúdez

*Centro de Investigación CAYEI – Universidad del
Caribe UNICARIBE (República Dominicana)*

Resumen

En este trabajo se describirá métodos novedosos para la síntesis de compuestos calcogenuros y perovskitas usando reactores implementados con un diseño novedoso y controlados electrónicamente usando algoritmos PWM-PID desarrollados con el entorno de programación LabVIEW. El éxito del desempeño de los reactores fue verificado a través de la deposición de películas delgadas de Sb_2Se_3 y de CsPbBr_3 , que han sido usadas para la fabricación de celdas solares que en corto tiempo ha presentado alta eficiencia.

Introducción

Con el fin de mitigar problemas medioambientales y reducir costos de manufactura, en la última década se ha implementado a nivel mundial un programa enfocado en el desarrollo de celdas solares basadas en nuevos materiales fotovoltaicos denominados emergentes. Estos nuevos materiales no contienen elementos tóxicos, son de bajo costo y se fabrican a partir de precursores abundantes en la naturaleza. Entre los dispositivos fotovoltaicos fabricados a partir de materiales emergentes que han logrado un mayor desarrollo se encuentran las celdas basadas en compuestos de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) con estructura tipo kesterita (Fella; Romanyuk y Tiwari, 2013), celdas solares orgánicas basadas en polímeros semiconductores (Hösel; Angmo y Krebs, 2013) y celdas de puntos cuánticos (Kouhnavard; Ikeda; Ludin; Khairudin; Ghaffari; Mat-Teridi y Sopian, 2014). Recientemente surgieron dos nuevas familias de materiales fotovoltaicos con los cuales se espera fabricar módulos fotovoltaicos que podrían dar solución a las limitaciones mencionadas. La primera familia son compuestos híbridos, sintetizados usando una mezcla de precursores orgánicos e inorgánicos, los cuales crecen formando una estructura cristalina tipo perovskita con composición RPbX_3

(Park, 2013), donde R es un catión orgánico, generalmente metilamonio (MA), y X es un elemento haluro, comúnmente Yodo (I). La segunda familia son compuestos calcogenuros ternarios de cobre como $\text{CuSb}(\text{Se}, \text{S}_2)$ y calcogenuros binarios como el Sb_2Se_3 que crecen con estructura cristalina tipo calcostibita (Zakutayev; Baranowski; Welch; Wolden y Toberer, 2014) (Welch; Baranowski; Zawadzki; Lany; Wolden y Zakutayev, 2015).

Películas delgadas de los materiales con estructura perovskita han sido preparados por técnicas de crecimiento en solución como *spin coating* y técnicas de crecimiento en vacío como evaporación (Shi y Jayatissa, 2018). El método de *spin coating* es el más utilizado en la fabricación de celdas solares y con el cual se han logrado las mayores eficiencias (Yoshikawa; Kawasaki; Yoshida; Irie; Konishi; Nakano y Yakamoto, 2017), pero no es adecuado para la fabricación a gran escala. También se han desarrollado otros métodos en solución que se han aplicado con éxito para la fabricación de películas de perovskita a gran escala (Saliba; Correa-Baena; Grätzel; Hagfeldt y Abate, 2018). Los compuestos basados en perovskitas están siendo fuertemente estudiados actualmente para ser usados como capa activa de celdas solares, debido a que tienen propiedades fotovoltaicas excepcionales, que han permitido fabricar dispositivos con eficiencias superiores al 25% en un corto período de tiempo (Saliba; Correa-Baena; Grätzel; Hagfeldt y Abate, 2018). Sin embargo, la inestabilidad en el desempeño de estos dispositivos representa un gran obstáculo para su transición a la producción industrial. Esta inestabilidad se debe a la degradación del compuesto RPbX_3 , provocado por la exposición a la humedad, temperatura elevada o radiación ultravioleta (UV).

Películas delgadas de compuestos calcogenuros tipo calcostibita también se han preparado por varias técnicas tales como: evaporación térmica (Rabhi; Kanzari y Rezig, 2009), *co-sputtering* (Chen; Kuo y Tuan, 2016), CBD (Chemical Bath Deposition) (Macías; Lugo; Benítez; López; Kharissov y Vásquez, 2017), sulfuración/selenización de los precursores metálicos (Colombara; Peter; Rogers; Painter y Roncallo, 2011). En general, los calcogenuros han sido utilizados como capa absorbente en celdas solares principalmente por su alta capacidad de absorción de luz. Entre estos materiales destacan el CdTe y compuestos tipo calcopirita basados en $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{S}, \text{Se})_2$, que hicieron una transición exitosa a la producción industrial; sin embargo, se sabe que estas dos tecnologías presentan serias limitaciones para poder atender la gran demanda potencial a futuro, debido a la escasez de algunos

de sus precursores (In,Ga,Te) (Wadia, Alivisatos y Kammen, 2009); la presencia de Cd en su composición también es otra limitante ambiental que tiene este tipo de dispositivos. Estos hechos han llevado a investigar con gran interés el desarrollo de materiales fotovoltaicos emergentes caracterizados por incluir elementos menos tóxicos y más abundantes. Entre los compuestos calcogenuros emergentes han llamado la atención los materiales pertenecientes a las familias de la kesterita y calcostibita por cumplir con las características antes mencionadas. Entre los compuestos de la familia de las kesteritas, el más investigado es el $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S,Se})_4$, con el que se han fabricado dispositivos con eficiencias del 12,6 % (Wang; Winkler; Gunawan; Gokmen; Todorov; Zhu y Mitzi, 2014), mientras que de la familia de las calcostibitas los más investigados son el $\text{CuSb}(\text{S,Se})_2$ y el $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ con los que se han fabricado células solares con eficiencias del 4,7 y 9,5 % respectivamente (Welch; Baranowski; Peng; Hempel; Eichberger; Unold y Zakutayev, 2017) (Li; Liang; Li; Liu; Zhang; Guo y Mai, 2019).

En este trabajo, películas delgadas de perovskitas totalmente inorgánicas de CsPbBr_3 y de compuestos calcostibita de Sb_2Se_3 fueron depositadas usando rutas de síntesis novedosas, que permitieron preparar estos materiales con buenas propiedades ópticas, estructurales y morfológicas, que permiten ser usados posteriormente como capas absorbentes en celdas solares. Estos materiales fueron depositados usando reactores con facilidades para controlar el proceso de deposición en forma automática, usando algoritmos desarrollados en el entorno de programación gráfica LabVIEW.

Aspectos experimentales

Síntesis de películas delgadas de CsPbBr_3 mediante evaporación secuencial de precursores

Para la síntesis del compuesto CsPbBr_3 se adecuó un equipo, cuyo diagrama de bloques se muestra en la figura 1. Este incluye las siguientes unidades:

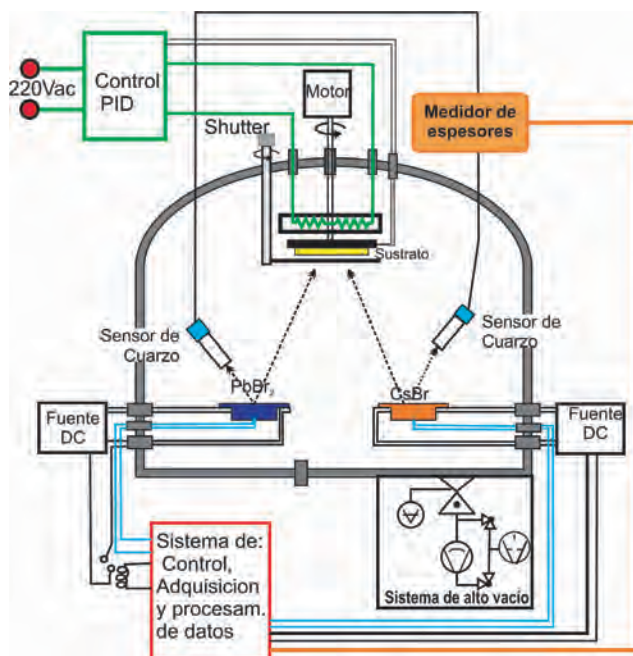


Figura 1. Equipo usado para la preparación de películas delgadas de CsPbBr₃ por el método de evaporación secuencial

Nota: elaboración propia.

- i. Sistema de vacío, constituido por una bomba mecánica y una bomba turbo molecular, las que permiten alcanzar un vacío del orden de 5×10^{-5} mbar.
- ii. Sistema de evaporación de los dos precursores (PbBr₂/ CsBr) a través de dos crisoles tipo celda Knudsen calentados indirectamente con un elemento calefactor de grafito por el cual se hace pasar una corriente del orden de 250A.
- iii. Porta-sustrato calentado indirectamente por radiación proveniente de una resistencia de grafito; la temperatura del sustrato es controlada electrónicamente con un regulador PID comercial.
- iv. Sistema electrónico con facilidades para realizar un control automático del proceso de evaporación de precursores. Este incluye funciones de control de la temperatura de evaporación y de la tasa de deposición de precursores, así como de visualización en tiempo real del proceso, las que son ejecutadas desde el computador mediante programas (instrumentos virtuales (VI)) desarrollados en LabVIEW. La temperatura

y tasa de deposición se controlan a través de cuatro algoritmos PID-PWM; dos de estos se usan para controlar la temperatura de los crisoles usados para evaporar los precursores (PbBr_2 y CsBr), y los otros dos para controlar la tasa de deposición de estos dos precursores.

El compuesto CsPbBr_3 fue preparado siguiendo una ruta basada en evaporación secuencial de los precursores (CsBr) y (PbBr_2), desde dos crisoles independientes, seguido de recocido para activar la reacción de estado sólido que da lugar a la formación del compuesto deseado.

Síntesis de películas delgadas de Sb_2Se_3 mediante selenización de capas de Sb

Considerando que la selenización de precursores metálicos por procedimientos convencionales generalmente conduce a muestras que crecen con una mezcla de la fase deseada y de fases secundarias, en este trabajo se utilizó un procedimiento novedoso para obtener la formación de películas puras de Sb_2S_3 ; este incluye un primer paso donde una película delgada de Sb se deposita por evaporación en alto vacío; posteriormente se introduce tanto la película delgada de Sb como Se en polvo en un horno tubular al cual se le realiza prevacío y luego se le introduce una mezcla de Ar y H_2 ; posteriormente, el horno se calienta con un sistema de lámparas IR para activar una reacción de estado sólido entre el Sb y el Se que dé lugar a la formación del compuesto Sb_2Se_3 . La temperatura de calentamiento es controlada electrónicamente con un sistema que realiza el control usando algoritmos PID y PWM desarrollados en el entorno de programación LabVIEW.

La síntesis se realizó usando películas delgadas de Sb con espesores del orden de 1200 nm y una masa de Se en polvo de 250 mg; el calentamiento del horno se realizó siguiendo una rutina de calentamiento novedosa que permitió obtener películas de Sb_2S_3 de fase pura a través de la calcogenización del precursor Sb.

Descripción del reactor desarrollado para llevar a cabo el proceso de selenización

La figura 2 muestra un diagrama esquemático del horno tubular diseñado y construido para la síntesis de películas de Sb_2Se_3 mediante selenización del precursor metálico (Sb). El horno cuenta con facilidades para realizar

el proceso de selenización controlando automáticamente la velocidad de calentamiento y la temperatura de final de selenización (set point) del horno, a través de algoritmos desarrollados utilizando el entorno de programación LabVIEW. Este equipo incluye las siguientes unidades:

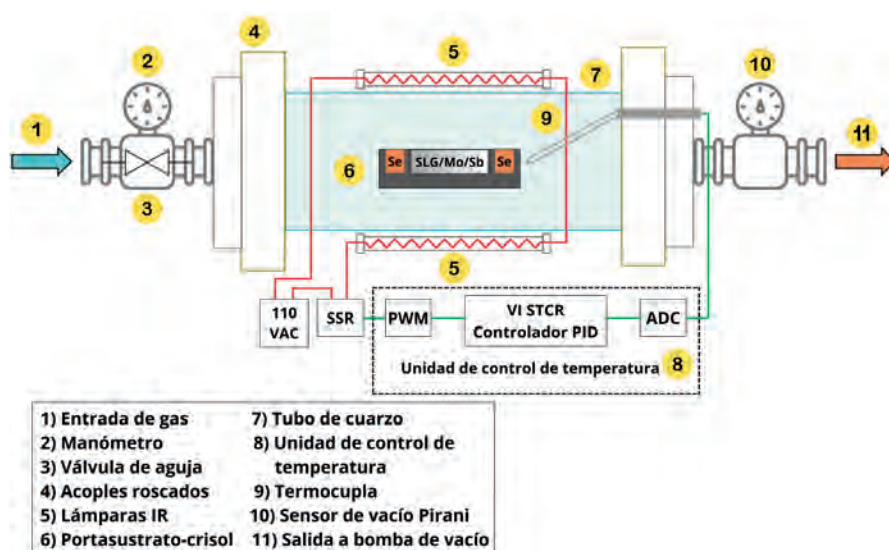


Figura 2. Ilustración esquemática del horno tubular desarrollado para preparar películas de Sb_2Se_3 mediante selenización del precursor Sb.

Nota: elaboración propia.

- i. Tubo de cuarzo (7): Calentado por la radiación generada por cuatro lámparas infrarrojas tubulares dispuestas simétricamente alrededor del exterior del tubo de cuarzo.
- ii. Portasustrato de grafito (6) con orificios en las esquinas para colocar cuatro crisoles de grafito que contienen selenio; el sistema glass/Mo/Sb se coloca en el centro del portasustrato durante el proceso de selenización.
- iii. Bridas de acero inoxidable (4) diseñadas para realizar un acoplamiento hermético con el tubo de cuarzo y realizar vacío en el interior del tubo de cuarzo. La brida consta de dos piezas roscadas de acero inoxidable que permiten el acoplamiento al vacío con el tubo de cuarzo a través de dos o-rings de Vitón que sellan el tubo a través de un anillo de presión intermedio.

- iv. Acoples rápidos (1) para introducir gas (mezcla de $\text{Ar}+\text{H}_2$) a través de una válvula de aguja (3).
- v. Acople en forma de T para conectar Bomba mecánica que realiza pre-vacío al tubo de cuarzo (11) y el sensor de vacío Pirani (10).
- vi. Unidad de control (8) con facilidades para generar las rampas de temperatura que calientan el horno y para controlar la temperatura de selenización. Las rampas de temperatura y el control de temperatura de selenización se realiza usando algoritmos PWM y PID desarrollados en el entorno de programación LabVIEW.

Descripción del sistema electrónico desarrollado para controlar el proceso de síntesis de películas delgadas de CsPbBr_3 y Sb_2Se_3

Un sistema de control en lazo cerrado (o retroalimentado) es aquel que utiliza la señal de salida del sistema y la compara con una señal de referencia de entrada o *set point*. A partir de la diferencia de ambas señales se crea un valor de error que es utilizado por el controlador para incidir sobre el comportamiento de la planta, de forma que el error se minimice a medida que este realiza su acción de control, es decir, el error tenderá a cero.

Como primer paso para el diseño de un sistema de control en lazo cerrado es necesario obtener un modelo matemático de la planta que se desea controlar, denominado función de transferencia ($G(s)$). Esta es de vital importancia, ya que describe de forma cercana la dinámica del sistema mediante ecuaciones diferenciales lineales e invariantes en el tiempo. Gracias al uso del *software* MATLAB y su módulo de identificación del sistema, se estiman los valores de los parámetros de la planta. Posteriormente, se realiza la sintonización del controlador PID a partir de la herramienta “PID tuner” de MATLAB y se observa su respuesta en el tiempo. En este caso, la salida del controlador PID varía el ciclo de trabajo una señal con modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés), que actúa sobre las lámparas infrarrojas tubulares.

El desarrollo de la aplicación de control simultáneo de temperatura de reactores (STCR) se realizó mediante el *software* LabVIEW. Gracias a la facilidad y versatilidad del lenguaje gráfico, la implementación de la interfaz de usuario y la programación del controlador PID para el control de la temperatura de los reactores se efectuó de manera satisfactoria. En la figura 3

se puede observar las gráficas de las pruebas del control de temperatura de los reactores.

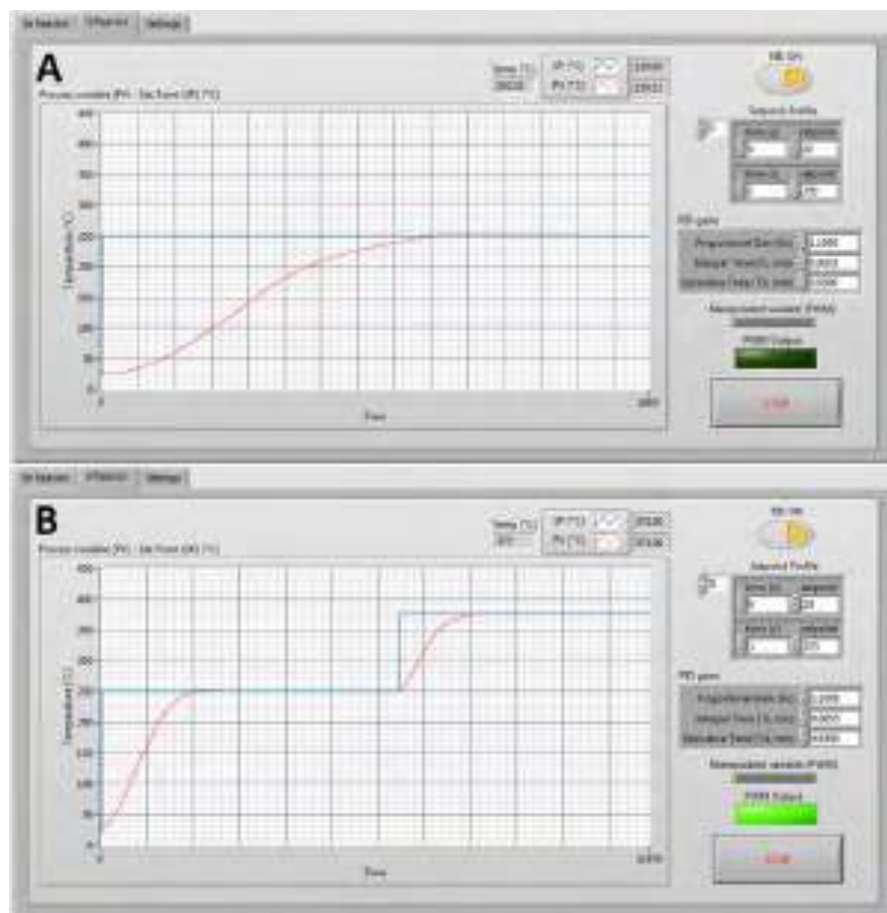


Figura 3. Pruebas de funcionamiento del sistema de control de temperatura de los reactores

Nota: elaboración propia.

Los resultados obtenidos durante la fase de desarrollo del *software* permitieron, posteriormente, registrarlo ante la Dirección Nacional de Derecho de Autor. Además, contribuyó en la mejora de la productividad en la fabricación de películas delgadas de Sb_2Se_3 y CsPbBr_3 debido a que permite el control simultáneo de la temperatura de recocidos en reactores independientes.

Evaluación del desempeño de los reactores

El desempeño de los reactores se evaluó mediante el depósito de un gran número de muestras variando los parámetros de síntesis. Para encontrar las condiciones que permitan depositar muestras con la composición química deseada, libre de fases secundarias y con propiedades ópticas, estructurales y morfológicas adecuadas para que este tipo de muestras puedan ser potencialmente utilizadas como capa absorbente en células solares, se realizó un estudio sobre la influencia de los principales parámetros de deposición sobre las mencionadas propiedades. Estas condiciones óptimas de deposición se encontraron evaluando el efecto de los parámetros de deposición sobre las propiedades ópticas, estructurales y morfológicas de las muestras depositadas, a través de caracterización realizada usando técnicas de espectrofotometría, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido (SEM).

Evaluación de propiedades estructurales

Películas delgadas de Sb_2Se_3

Para encontrar condiciones de síntesis que permitieran crecer películas delgadas con composición Sb_2Se_3 libre de fases secundarias se realizó un estudio del efecto de parámetros de síntesis sobre la fase y estructura cristalina. Para esto se varió la velocidad de rampa de calentamiento (entre 20-40 °C/min), temperatura final de selenización del Sb (entre 350 y 450 °C) y masa de Se (entre 150 y 350 mg), manteniendo el espesor de la capa de Sb en 1200 nm.; la fase cristalina en que crecieron estas muestras se estableció a través de medidas de XRD. El estudio mostró que las muestras obtenidas crecieron con una mezcla de diferentes fases incluyendo la fase Cs_2Sb_3 con estructura cristalina ortorrómbica y también fases secundarias de otros compuestos, al parecer correspondientes al $MoSe_2$ o al Sb_2MoO_6 . Al final de este estudio se logró encontrar parámetros de síntesis que condujeron al crecimiento de películas delgadas de Sb_2Se_3 con estructura ortorrómbica y libre de fases secundarias (ver Figura 4). Este tipo de muestras se lograron crecer usando los parámetros listados en la Tabla 1.

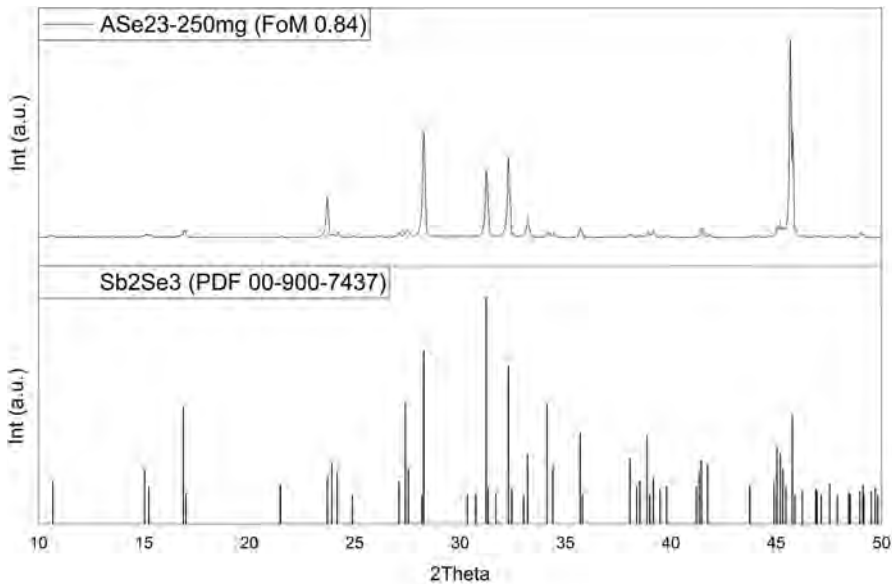


Figura 4. Difractogramas de películas delgadas de Sb_2Se_3 fabricadas selenizando una capa de Sb de 1200 nm usando temperatura de selenización de 400°C y masa de Se de 250 mg.

Nota: elaboración propia.

Comparando los picos del difractograma obtenido experimentalmente con los datos del estándar PDF de Sb_2Se_3 y la coincidencia de picos con los datos PDF 00-900-7437 se concluye que usando los parámetros mostrados en la Tabla 1 se logra obtener películas delgadas de Sb_2Se_3 libre de fases secundarias, con estructura ortorrómbica.

Tabla 1. Parámetros de síntesis que permitieron depositar películas delgadas de Sb_2Se_3 con estructura ortorrómbica, libre de fases secundarias

Parámetros de síntesis	Valores óptimos
Relación: espesor capa de Sb (en nm) /Masa de Se (en mg)	1200/250
Velocidad calentamiento, rampa de temperatura (°C/min.)	35
Temp. Final de selenización (°C)	400
Tiempo de selenización (min.)	15

Nota: elaboración propia.

Películas delgadas de CsPbBr_3

Inicialmente, se realizó un estudio para encontrar condiciones de síntesis que permitieran crecer películas delgadas con composición CsPbBr_3 libre de fases secundarias. Para esto se varió la relación de espesores $\text{CsBr}/\text{PbBr}_2$ en el rango entre (1:1 y 1:2), la temperatura de sustrato (entre 100 y 150 °C), la temperatura de recocido entre TA y 280°C) y tasa de deposición medida con un monitor de espesores Maxtec TM-400 (entre 3 y 8 Å/s); la fase cristalina en que crecieron estas muestras se estableció a través de medidas de XRD. El estudio mostró que las muestras obtenidas crecieron con una mezcla de diferentes fases incluyendo la fase CsPbBr_3 cúbica y ortorrómbica y también fases secundarias de otros compuestos ternarios.

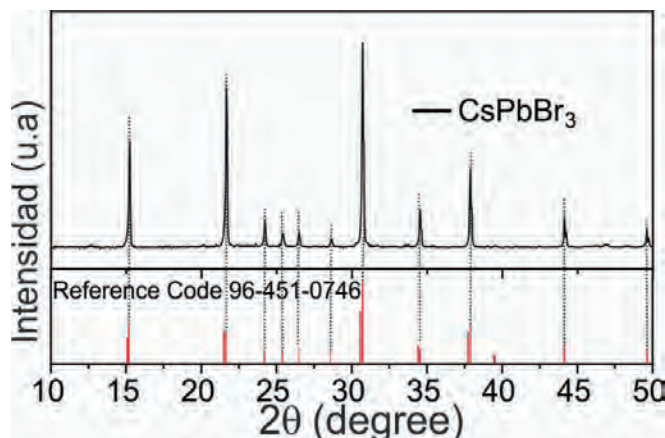


Figura 5. Espectro de difracción de rayos X de película delgada de CsPbBr_3 depositadas por evaporación secuencial bajo condiciones óptimas

Nota: elaboración propia.

En particular, se encontró que las películas depositadas usando un exceso de CsBr (relación 1:3) crecen con una mezcla de las fases CsPbBr_3 ortorrómbica y la fase secundaria Cs_4PbBr_6 , mientras que las muestras depositadas con exceso de PbBr_2 (relación 1:1), da lugar a muestras que incluyen mezcla de las fases CsPbBr_3 ortorrómbica y CsPb_2Br_5 . Al final de este estudio se logró encontrar parámetros de síntesis que condujeron al crecimiento de películas delgadas de CsPbBr_3 con estructura ortorrómbica y libre de fases secundarias (ver Figura 5). Este tipo de muestras se lograron crecer usando los parámetros listados en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de síntesis que permitieron depositar películas delgadas de CsPbBr₃ con estructura ortorrómbica, libre de fases secundarias

Parámetros de síntesis	Valores óptimos
Relación de espesores de precursores: PbBr ₂ /CsBr	1:1.38
Tasa de deposición de precursores: (CsBr/PbBr ₂)	6Å/4 Å
Temperatura de sustrato °C	150
Temperatura de recocido °C	220
Tiempo de recocido (min.)	20

Nota: elaboración propia.

Comparando las reflexiones del difractograma obtenido experimentalmente con los datos del estándar PDF de Sb₂Se₃ (PDF 96-451-0746) y la coincidencia de picos con los datos PDF 96-451-0746, se concluye que usando los parámetros mostrados en la Tabla 2 se logra obtener películas delgadas de perovskita con composición CsPbBr₃ libre de fases secundarias, con estructura ortorrómbica.

Evaluación de propiedades morfológicas

Películas delgadas de Sb₂Se₃

También se evaluó el efecto de las variables de síntesis sobre la morfología de las películas delgadas de Sb₂Se₃, para determinar las condiciones que dan lugar al crecimiento de muestras con morfología óptima. El resultado de este estudio se evaluó a través de medidas de microscopía SEM. En particular, se estudió el efecto de la masa de Se usada en la selenización del Sb y la temperatura final de selenización sobre las propiedades morfológicas. La Figura 6 muestra la imagen SEM de la muestra de Sb₂Se₃ que presentó la morfología óptima; esta fue preparada usando los parámetros listados en la Tabla 1.

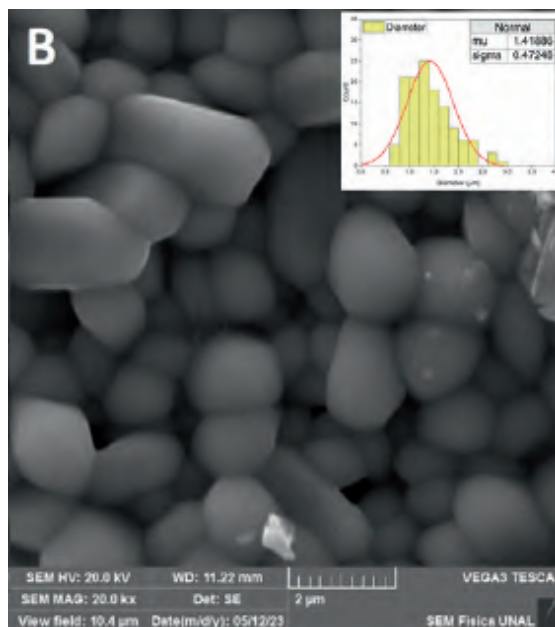


Figura 6. Imagen SEM de película delgada de Sb_2Se_3 preparada bajo condiciones óptimas.

Nota: elaboración propia.

Las películas de Sb_2Se_3 preparadas bajo parámetros óptimos exhiben una excelente morfología (ver Figura 6), libre de clústeres y poros, caracterizada por granos compactos de tamaño promedio de $1,4 \mu\text{m}$ distribuidos con mayor grado de homogeneidad, lo cual favorece el transporte de portadores.

Películas delgadas de CsPbBr_3

La influencia de variables de síntesis sobre la morfología de las películas delgadas de CsPbBr_3 fue realizada a través de un estudio basado en caracterización con microscopía SEM que incluyo el efecto de los parámetros listados en la Tabla 2 sobre la morfología, con énfasis en el efecto de la temperatura y tiempo de recocido. La Figura 7 muestra la imagen SEM de la muestra de CsPbBr_3 que presentó la morfología óptima; esta fue preparada usando los parámetros listados en la Tabla 2.

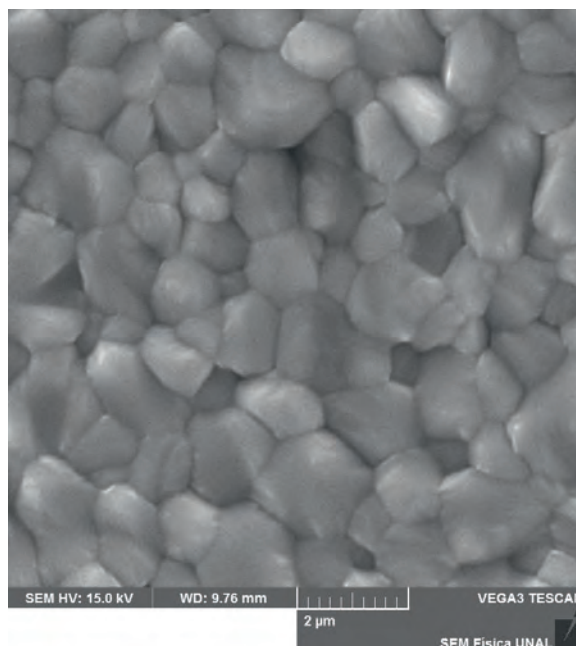


Figura 7. Imagen SEM de película delgada de CsPbBr_3 preparada bajo condiciones óptimas

Nota: elaboración propia.

El estudio del efecto de parámetros de síntesis sobre la morfología reveló que las películas delgadas de CsPbBr_3 presentan en general una morfología constituida por granos esféricos compactos libre de poros que dan lugar a un excelente grado de cubrimiento de todo el sustrato, lo cual favorece tanto el transporte eléctrico de portadores en el dispositivo como evitar la formación de cortos circuitos, con lo cual se mejora la eficiencia de la celda. También se observa que el tamaño de grano aumenta significativamente con el aumento de la temperatura de recocido, pasando de valores medios cercanos a 300 nm a tamaños de grano mayores que 1,5 μm .

Evaluación de propiedades ópticas

Películas delgadas de Sb_2Se_3

Teniendo en cuenta que las películas delgadas de Sb_2Se_3 preparadas mediante selenización del Sb son muy dispersivas, estas se caracterizaron

ópticamente a través de medidas de reflectancia difusa (R_d) para evaluar el efecto de parámetros de síntesis sobre el coeficiente de absorción y gap óptico E_g ; para ello se utiliza un método descrito por A. B. Morphy basado en la teoría de Kubelka-Munk, que permite determinar el gap de energía de materiales que dispersan luz, a través del cálculo de la denominada función de Kubelka-Munk (F_{KM}) usando la siguiente relación (Kubelka, 1931):

$$F_{KM}(R_d) = \frac{(1 - R_d)^2}{2R_d} \quad (3.1)$$

Donde R_d es la reflectancia difusa.

Adicionalmente, considerando que para materiales de gap directo se cumple la relación:

$$[F_{KM}(R_d) * hv]^2 = A (hv - E_g) \quad (3.2)$$

El valor de E_g fue determinado a partir del intercepto con el eje hv que resulta de extrapolar la región lineal de la curva $[F_{KM}(R_d) * hv]^2$ vs hv . En la Figura 8 se muestran las curvas de reflectancia difusa y de $[F_{KM}(R_d) * hv]^2$ vs hv correspondientes a una película de Sb_2Se_3 preparada bajo condiciones óptimas.

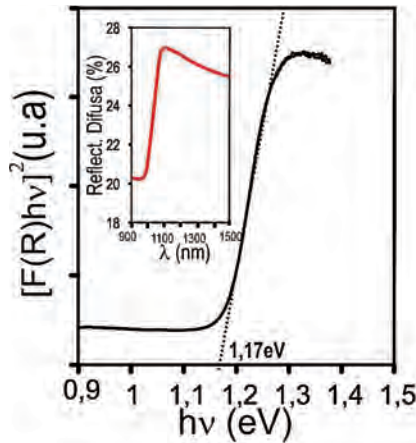


Figura 8. Curvas de reflectancia difusa y $[F_{KM}(R_d) * hv]^2$ vs hv , correspondientes a películas de Sb_2Se_3 preparadas bajo condiciones óptimas

Nota: elaboración propia

Los resultados obtenidos de este estudio indicaron que la masa de Se usada durante la síntesis de estas películas afecta el *gap* E_g (varió entre 0,99 eV y 1,17 eV), indicando que la cantidad de Se usada para preparar películas delgadas de Sb_2Se_3 mediante selenización del precursor metálico afecta la estructura de bandas, al parecer asociado a variación de la composición química de las muestras inducido por la variación de la cantidad de Se que participa en la reacción de estado sólido que da lugar a la formación de estas películas.

Películas delgadas de CsPbBr_3

La influencia de parámetros de síntesis sobre las propiedades ópticas de las películas de CsPbBr_3 se estudió a través de mediciones de transmitancia y reflectancia espectral. A partir de estas medidas se obtuvo el coeficiente de absorción y el *gap* de energía. La Figura 9 muestra los espectros de transmitancia y reflectancia de una película de CsPbBr_3 preparada bajo condiciones óptimas, y en el recuadro se muestra una curva de $(\alpha h\nu)^2$ vs $h\nu$ (curva de Tauc) obtenida a partir del cálculo del coeficiente de absorción α determinado usando la relación:

$$\alpha = -(1/d) \ln \frac{T(\lambda)}{1-R(\lambda)} \quad (\text{Pankove, 2012}).$$

Donde $T(\lambda)$ y $R(\lambda)$ son valores de transmitancia y reflectancia obtenidos experimentalmente y d el espesor de la película. El valor de E_g se obtuvo a partir de la intersección con el eje $h\nu$ de la curva de $(h\nu)^2$ vs $h\nu$. Se observa que la película de CsPbBr_3 tienen un *gap* de energía E_g de 2,34 eV.

Los resultados de este estudio revelaron que, en general, en este tipo de muestra, la temperatura de recocido no afecta el valor de E_g ; sin embargo, el recocido afecta levemente la magnitud de la transmitancia, comportamiento que está asociado básicamente al aumento del grado de rugosidad de las muestras inducido por el aumento del tamaño de grano. También se encontró que las películas de CsPbBr_3 presentan una alta pendiente en la vecindad del borde de la banda de conducción, indicando que en este tipo de material la absorción de fotones se da predominantemente a través de absorción fundamental, que va acompañada de transición de portadores de la banda de valencia a la banda de conducción.

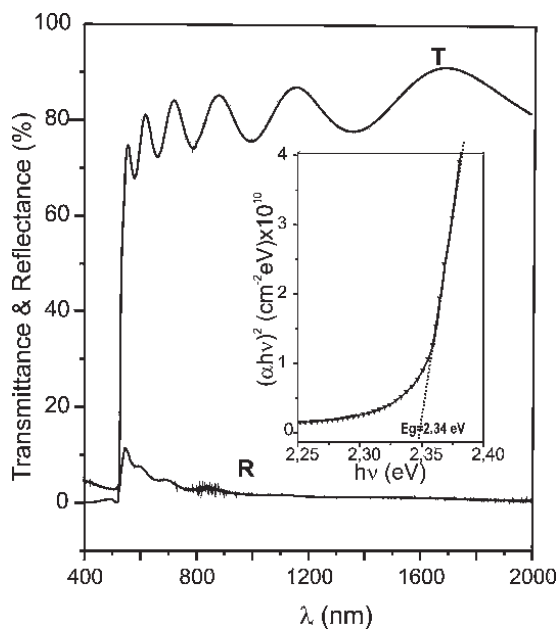


Figura 9. Transmitancia y reflectancia espectral de una película de CsPbBr_2 fabricada usando condiciones óptimas. En el recuadro se muestra la correspondiente curva de Tauc, indicando el valor de E_g .

Nota: elaboración propia.

Conclusiones

En este trabajo se reporta el uso del paquete LabVIEW para el desarrollo de algoritmos de control de procesos para la síntesis de películas delgadas usadas en la fabricación de celdas solares. En particular, se presentan aspectos del diseño, implementación y automatización de dos reactores. El primero fue un reactor de bajo costo implementado con un diseño novedoso y controlado electrónicamente con un *software* avanzado basado en algoritmos PID y PWM desarrollados en el entorno de programación gráfica LabVIEW. Con este reactor se logró sintetizar películas delgadas de Sb_2Se_3 libres de fases secundarias con estructura ortorrómbica, usando una ruta basada en selenización de su precursor metálico (Sb). El segundo fue un reactor para la síntesis de películas delgadas de CsPbBr_3 con estructura perovskita, el cual fue controlado con un sistema electrónico con facilidades para realizar un control automático del proceso de

deposición de los perovskitas usando una ruta basada en evaporación secuencial de sus precursores (PbBr_2 y CsBr). Este incluye funciones de control de la temperatura de evaporación y de la tasa de deposición de precursores, así como de visualización en tiempo real del proceso, las que son ejecutadas desde el computador mediante programas (instrumentos virtuales) desarrollados en LabVIEW.

El excelente desempeño de los reactores fue verificado mediante la deposición de películas delgadas de los materiales Sb_2Se_3 y CsPbBr_3 , que exhibieron optimas propiedades ópticas, estructurales y morfológicas, lo cual permite pensar que estas tienen características adecuadas para usarlas posteriormente como capa activa en celdas solares.

Referencias

- Chen, W. L., Kuo, D. H., & Tuan, T. T. A. (2016). Preparation of CuSbS_2 thin films by co-sputtering and solar cell devices with band gap-adjustable n-type InGaN as a substitute of ZnO . *Journal of electronic materials*, 45, 688-694.
- Colombara, D., Peter, L. M., Rogers, K. D., Painter, J. D., & Roncallo, S. (2011). Formation of CuSbS_2 and CuSbSe_2 thin films via chalcogenisation of Sb-Cu metal precursors. *Thin Solid Films*, 519(21), 7438-7443.
- Fella, C. M., Romanyuk, Y. E., & Tiwari, A. N. (2013). Technological status of Cu_2ZnSn (S, Se) 4 thin film solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 119, 276-277.
- Hösel, M., Angmo, D., & Krebs, F.C. (Ed.). (2013). Handbook of organic materials for optical and (opto) electronic devices: properties and applications. *Elsevier*. 17, 473-507.
- Kouhnavard, M., Ikeda, S., Ludin, N. A., Khairudin, N. A., Ghaffari, B. V., Mat-Teridi, M. A., ... & Sopian, K. (2014). A review of semiconductor materials as sensitizers for quantum dot-sensitized solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 397-407.
- Kubelka, P. (1931). Ein beitrag zur optik der farbanstriche. *Z. tech. Phys*, 12, 593-601.
- Li, Z., Liang, X., Li, G., Liu, H., Zhang, H., Guo, J., ... & Mai, Y. (2019). 9.2%-efficient core-shell structured antimony selenide nanorod array solar cells. *Nature communications*, 10(1), 125.

- Macías, C., Lugo, S., Benítez, Á., López, I., Kharissov, B., Vázquez, A., & Peña, Y. (2017). Thin film solar cell based on CuSbS₂ absorber prepared by chemical bath deposition (CBD). *Materials Research Bulletin*, 87, 161-166.
- Pankove, J. I. (2012). *Optical processes in semiconductors*. Courier Corporation.
- Park, N. G. (2013). Organometal perovskite light absorbers toward a 20% efficiency low-cost solid-state mesoscopic solar cell. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 4(15), 2423-2429.
- Rabhi, A., Kanzari, M., & Rezig, B. (2009). Optical and structural properties of CuSbS₂ thin films grown by thermal evaporation method. *Thin Solid Films*, 517(7), 2477-2480.
- Saliba, M., Correa-Baena, J. P., Grätzel, M., Hagfeldt, A., & Abate, A. (2018). Perovskite solar cells: from the atomic level to film quality and device performance. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(10), 2554-2569.
- Shi, Z., & Jayatissa, A. H. (2018). Perovskites-based solar cells: A review of recent progress, materials and processing methods. *Materials*, 11(5), 729.
- Wadia, C., Alivisatos, A. P., & Kammen, D. M. (2009). Materials availability expands the opportunity for large-scale photovoltaics deployment. *Environmental science & technology*, 43(6), 2072-2077.
- Wang, W., Winkler, M. T., Gunawan, O., Gokmen, T., Todorov, T. K., Zhu, Y., & Mitzi, D. B. (2014). Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency. *Advanced energy materials*, 4(7).
- Welch, A. W., Baranowski, L. L., Zawadzki, P., Lany, S., Wolden, C. A., & Zakutayev, A. (2015). CuSbSe₂ photovoltaic devices with 3% efficiency. *Applied physics express*, 8(8), 082301.
- Welch, A. W., Baranowski, L. L., Peng, H., Hempel, H., Eichberger, R., Unold, T., ... & Zakutayev, A. (2017). Trade-offs in thin film solar cells with layered chalcostibite photovoltaic absorbers. *Advanced energy materials*, 7(11), 1601935.
- Yoshikawa, K., Kawasaki, H., Yoshida, W., Irie, T., Konishi, K., Nakano, K., ... & Yamamoto, K. (2017). Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%. *Nature energy*, 2(5), 1-8.
- Zakutayev, A., Baranowski, L. L., Welch, A. W., Wolden, C. A., & Toberer, E. S. (2014, June). Comparison of Cu₂SnS₃ and CuSbS₂ as potential solar cell absorbers. In *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)* (pp. 2436-2438). IEEE.

Capítulo 3

OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DEL BAGAZO CERVECERO COMO ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ENFOCADO HACIA LA ECONOMÍA CIRCULAR

*Obtaining Activated Carbon from Brewery
Waste as a Strategy for Reducing Solid Waste
with a Focus on the Circular Economy*

Diana Marcela Rodríguez
Universidad ECCI

Carlos Andrés Morales Suárez
Universidad ECCI

Zahira Valeria Poloche Torres
Universidad ECCI

Michele Ando Ortiz
Universidad ECCI

Ana María Orjuela Méndez
Universidad ECCI

Resumen

El bagazo de malta generado por la industria cervecera constituye uno de los principales residuos sólidos de este sector y, debido a su alta carga orgánica, representa un desafío ambiental cuando no es gestionado adecuadamente. En este capítulo se analiza la valorización del bagazo cervecero mediante su conversión en carbón activado, empleando la carbonización hidrotermal como estrategia alineada con los principios de la economía circular. Se describen las etapas de recolección, secado, carbonización y activación química con ácido fosfórico, así como la caracterización fisicoquímica del material obtenido. Los resultados evidencian que el carbón activado producido presenta propiedades adecuadas de pH, bajo contenido de humedad y cenizas, y una superficie con grupos funcionales que favorecen su uso en procesos de adsorción. Esta alternativa contribuye a la reducción de residuos industriales y al aprovechamiento eficiente de subproductos, aportando a prácticas sostenibles coherentes con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Introducción

La transformación de residuos en recursos valiosos es un enfoque esencial para promover soluciones sostenibles que mitiguen el impacto ambiental de las actividades industriales. En este contexto, la industria cervecera enfrenta un desafío significativo relacionado con la gestión del bagazo de malta (BSG), un subproducto que constituye aproximadamente el 85% de los residuos generados durante la elaboración de cerveza (García, 2017). Este material, resultante de la extracción de azúcares y otros componentes durante la cocción de los granos, suele ser desechado de forma inadecuada. Su acumulación en vertederos no solo agrava el problema del manejo de residuos sólidos, sino que también contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero, como el metano, debido a su lenta descomposición (Rivas, 2018).

A pesar de ser un residuo voluminoso, el bagazo de malta posee un alto contenido de materia orgánica que, con un manejo adecuado, puede transformarse en un recurso valioso (González-García, 2018). En este sentido, la conversión del BSG en carbón activado se presenta como una solución innovadora y sostenible. El carbón activado, un material altamente poroso y adsorbente,

tiene aplicaciones industriales diversas, como la purificación de agua, el tratamiento de gases y la eliminación de contaminantes en procesos químicos (Rodríguez-Reinoso et al., 2006). Esta transformación no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también fortalece la economía circular, un modelo orientado a maximizar el aprovechamiento de los recursos y minimizar los desechos.

Este capítulo aborda la investigación dedicada a convertir el bagazo de malta en carbón activado, detallando las técnicas y metodologías empleadas, así como los objetivos, la metodología, los resultados y las conclusiones obtenidos. A lo largo del análisis, se destaca la relevancia de esta propuesta no solo como una solución para la gestión de residuos, sino también como una estrategia para fomentar prácticas sostenibles dentro y fuera de la industria cervecera. Con el respaldo de la investigación científica y la implementación de tecnologías apropiadas es posible avanzar hacia un modelo industrial que minimice el impacto ambiental y maximice el valor de los recursos disponibles.

En este contexto, el capítulo se centra en la obtención del carbón activado a partir del bagazo de malta generado por la industria cervecera, en el marco de la economía circular. Para ello, se analiza la eficiencia de la carbonización hidrotermal (HTC) como método de conversión del bagazo de malta en carbón activado, identificando las condiciones óptimas del proceso. Asimismo, se busca aplicar un método de activación al carbón obtenido, caracterizar sus propiedades fisicoquímicas y evaluar la viabilidad de la producción mediante la técnica HTC, considerando sus posibles aplicaciones en el ámbito industrial.

Proceso experimental para la obtención del carbón activado

Para el desarrollo del estudio se estableció una secuencia de etapas metodológicas que incluyen la recolección y el secado del bagazo de cervecería (BSG), seguido de su tratamiento a altas temperaturas en un reactor especializado que permite llevar a cabo la carbonización hidrotermal (HTC). Este proceso resulta crucial, ya que transforma residuos con alto contenido de humedad en un material carbonoso precursor conocido como hidrochar.

Posteriormente, se realizó un proceso de activación química utilizando ácido fosfórico (H_3PO_4) al 50%. Esta etapa es fundamental para aumentar la porosidad y el área superficial del hidrochar, optimizando así su capacidad de adsorción. La metodología de esta investigación fue diseñada de manera sistemática y estructurada, con el propósito de transformar el bagazo de malta (BSG) proveniente de la industria cervecera en carbón activado de alta calidad. A continuación, se describen las etapas clave del proceso, desde la recolección de muestras hasta la caracterización del carbón activado obtenido:

Recolección de muestras

La primera fase del estudio consistió en la recolección de BSG proveniente de diversas cervecerías artesanales ubicadas en Bogotá. Se realizó una selección de cervecerías destacadas, entre las que se encuentran La Milagrosa, Moonshine y Tauros, lo que permitió obtener una muestra diversificada del bagazo de malta. Este enfoque garantizó una caracterización representativa de las propiedades del subproducto bajo diferentes condiciones de producción, asegurando la diversidad en las muestras. Las zonas donde se ubican las empresas seleccionadas para la recolección se ilustran en la figura 1.



Figura 1. Mapa de Bogotá dividido en las localidades en las que se encuentran ubicadas las plantas de producción

Nota: elaboración propia.

Durante esta etapa, se prestó especial atención a las condiciones de almacenamiento del BSG, asegurando que se mantuviera en un ambiente seco y libre de contaminantes. Las muestras fueron transportadas al laboratorio en recipientes herméticos para evitar la pérdida de humedad y la contaminación.

Secado del bagazo de malta

Una vez en el laboratorio, el BSG fue sometido a un proceso de secado para eliminar el exceso de humedad, lo cual es crucial para la eficiencia del proceso de carbonización. El secado se realizó a una temperatura de 110 °C durante un período de 12 horas. Este procedimiento se llevó a cabo en un horno de convección, asegurando una distribución uniforme del calor. Al finalizar este proceso, se pesaron las muestras secas para determinar su contenido de humedad inicial y se registraron para los análisis posteriores, tal y como se puede evidenciar en la figura 2.



Figura 2. Muestra de bagazo de cerveza

Nota: elaboración propia.

Carbonización Hidrotermal (HTC)

La carbonización hidrotermal se realizó utilizando dos reactores elaborados para operar a altas temperaturas y presiones controladas. Específicamente, para el desarrollo experimental se diseñaron dos reactores de distinta capacidad (figura 3), uno con un volumen de 180 mL y otro de 80 mL.



Figura 3. Reactor de carbonización hidrotermal

Nota: elaboración propia.

Ambos reactores fueron contruidos utilizando tubo galvanizado para tuberías de alta presión como material exterior, con un diámetro fijo de 2,5 pulgadas. Sin embargo, el reactor de mayor capacidad tiene una longitud de 12 cm, mientras que el de menor capacidad mide 10 cm. Para la chaqueta interna se empleó teflón de alta pureza (aproximadamente 98 %) con el fin de garantizar resistencia química y estabilidad térmica. En la parte superior de cada reactor se integró un soporte de hierro con un grosor igual al del tubo galvanizado, diseñado para sostener la tapa del contenedor interno y prevenir deformaciones del teflón bajo presión. Adicionalmente, en la tapa del tubo galvanizado se instaló un tornillo de 10 mm de diámetro, junto con una arandela de hierro y una manija superior, lo que facilita la liberación de presión acumulada en el reactor (figura 4).



Figura 4. Interior reactor de carbonización hidrotermal

Nota: elaboración propia.

Este método es particularmente adecuado para la conversión de residuos orgánicos con alto contenido de humedad. El BSG seco se introdujo en el reactor, donde se sometió a una temperatura de 220 °C durante un período de 2 horas. Durante este proceso, se aplicó una presión de aproximadamente 20 bar, lo cual favoreció la transformación del material en un precursor carbonoso conocido como hidrochar.

El proceso de HTC se monitorizó continuamente para asegurar que las condiciones se mantuvieran dentro de los parámetros establecidos. Al finalizar la carbonización, el hidrochar se extrajo del reactor y se dejó enfriar a temperatura ambiente. Posteriormente, se realizó un análisis visual y se registraron las características físicas del hidrochar obtenido.

Activación química

La activación química es un paso crítico en la producción de carbón activado, ya que incrementa la porosidad y el área superficial del material (Bricio, 2010). Para esta fase, se utilizó ácido fosfórico (H_3PO_4) al 50% como agente activante. El hidrochar obtenido se impregnó en una solución de H_3PO_4 en proporciones de 1:2 y 1:3 (hidrochar: ácido), durante un período de 12 horas. Esta impregnación se realizó a temperatura ambiente, garantizando una distribución uniforme del ácido sobre el material.

Tras la impregnación, el hidrochar fue sometido a un proceso de activación térmica en un horno mufla a 400 °C durante 2 horas. Este tratamiento térmico permite abrir los poros en la estructura del carbón, mejorando así su capacidad de adsorción. Al finalizar la activación, el material fue enfriado y posteriormente lavado con agua caliente para eliminar cualquier residuo de ácido, garantizando la estabilidad y pureza del carbón activado (figura 5).

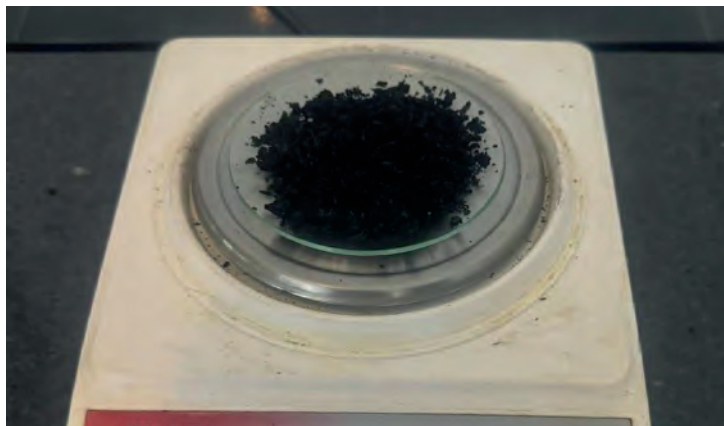


Figura 5. Muestra de carbón activado

Nota: elaboración propia.

Caracterización del carbón activado

La caracterización del carbón activado se realizó mediante varios análisis para evaluar sus propiedades fisicoquímicas. Se realizaron las siguientes pruebas:

- Análisis de pH: se determinó el pH del carbón activado disolviendo una muestra en agua destilada y utilizando un medidor de pH.
- Contenido de humedad: se ejecutó un análisis gravimétrico para determinar el contenido de humedad residual en el carbón activado.
- Contenido de cenizas: el contenido de cenizas se evaluó mediante la incineración de una muestra en un horno a 600 °C durante 4 horas.
- Análisis de grupos funcionales: se utilizaron métodos de espectroscopia para identificar los grupos funcionales presentes en la superficie del carbón activado, incluyendo el método de Boehm.

Esta metodología integral permite no solo obtener carbón activado de calidad a partir del BSG, sino también caracterizar sus propiedades, lo cual es fundamental para evaluar su potencial en aplicaciones industriales. Con estos procedimientos se busca contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles en la gestión de residuos de la industria cervecera y promover la economía circular.

Resultados

Los resultados obtenidos en el desarrollo de esta investigación destacan la efectividad del enfoque propuesto para la valorización del bagazo de cerveza (BSG) como materia prima para la producción de carbón activado. Cada etapa del proceso contribuyó significativamente a alcanzar un material con propiedades físicas y químicas óptimas. A continuación, se presentan los resultados clave obtenidos, incluyendo la caracterización del hidrochar, el impacto del proceso de activación química y las propiedades finales del carbón activado, evidenciando su potencial para diversas aplicaciones industriales y ambientales.

Propiedades fisicoquímicas

Análisis de pH

Los resultados del análisis de pH del carbón activado (CA) obtenido se presentan en la Tabla 1, donde se reportan valores entre 4.55 y 6.15, con un promedio de 5.4. Este rango se atribuye al uso de ácido fosfórico (H_3PO_4) como agente en el proceso de activación química.

Tabla 1. Resultados de pH

Muestra de CA	pH
Milagros	6.15
Tauros	4.55
Moonshine	4.91
El Parche	5.62
Manigua	6.02
Tomahawk	5.35

Nota: elaboración propia.

La elección de un activador ácido influye directamente en la química de la superficie del carbón activado, favoreciendo la formación de grupos funcionales ácidos. Estos grupos pueden protonarse durante la activación, lo que explica el pH promedio obtenido. Un pH de 5.4 indica características ácidas, especialmente útiles para absorber contaminantes cargados negativamente, como ciertos metales pesados y compuestos orgánicos.

Análisis próximo

El análisis próximo incluyó la determinación de humedad y contenido de cenizas. Los resultados ilustrados en la figura 7 indican que el carbón activado presenta un bajo contenido de humedad, ideal para aplicaciones de adsorción, ya que minimiza el bloqueo de los poros por agua. Adicionalmente, el contenido reducido de cenizas refleja una buena pureza del material, favoreciendo su eficiencia en procesos de adsorción sin interferencias de residuos inorgánicos.

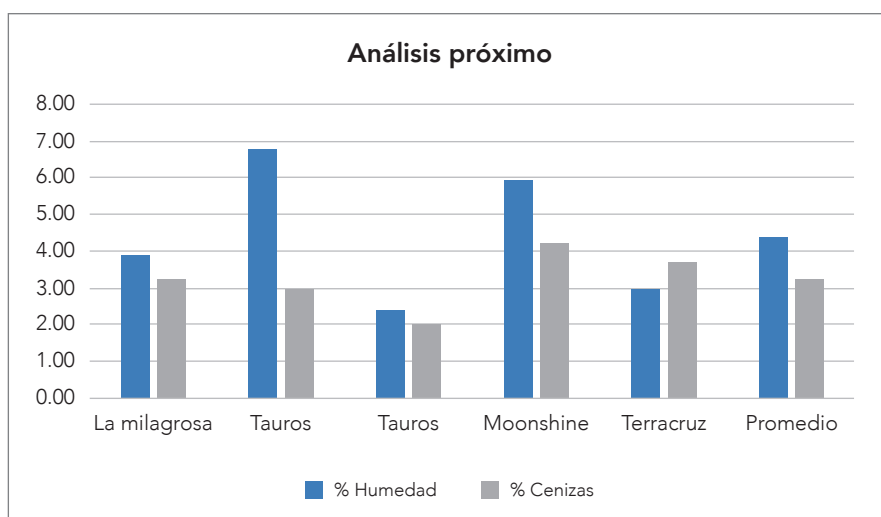


Figura 7. Resultados análisis próximo

Nota: elaboración propia.

Análisis de grupos funcionales

El análisis de grupos funcionales ácidos y básicos reveló variaciones importantes entre las muestras, influenciadas por las condiciones del proceso de activación, como se puede evidenciar en la figura 8. Frente a los grupos ácidos: la muestra *Moonshine* mostró el mayor contenido, con 0.00902 meq/g, destacándose frente a *Tauros*, cuyos valores oscilaron entre 0.007874 meq/g (reactor pequeño) y 0.0085 meq/g (reactor grande). Estas diferencias podrían deberse a variaciones en temperatura y tiempo de activación. Mientras que para los grupos básicos para *Moonshine*, se

obtuvo un contenido de 0.00888 meq/g, mientras que *Tauros* presentó 0.00852 meq/g. Aunque las diferencias son mínimas, *Moonshine* podría ser ligeramente más eficiente en adsorción de contaminantes ácidos.

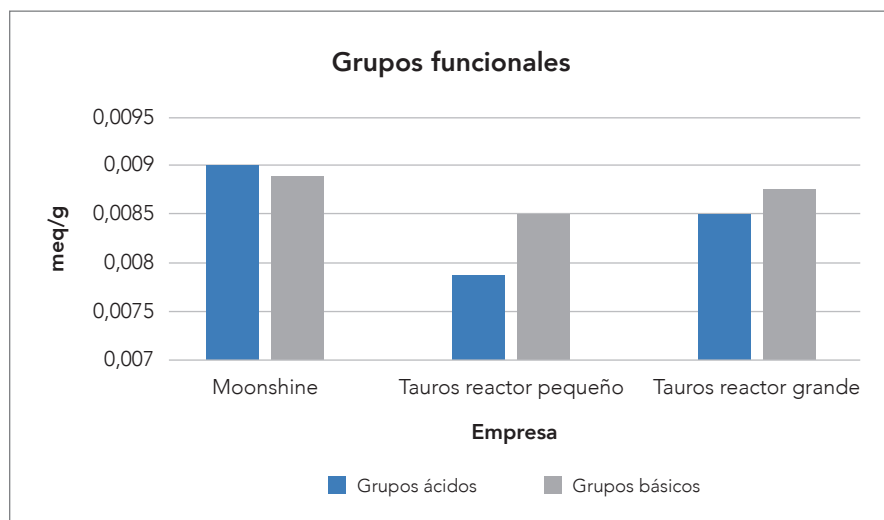


Figura 8. Grupos funcionales

Nota: elaboración propia.

Rendimiento

El rendimiento del proceso de carbonización hidrotermal (HTC) varió según las muestras y el tipo de reactor utilizado. En los reactores de 80 mL y 180 mL se observaron diferencias significativas en la eficiencia, con mayor rendimiento en las muestras proporcionadas por la empresa *Tauros*. Esta ventaja puede estar relacionada con el uso de cebada importada de Alemania, cultivada en condiciones climáticas óptimas que favorecen la uniformidad del grano y, por ende, la eficiencia en la producción de malta. En contraste, las variaciones climáticas en Colombia afectan la calidad del grano, lo que puede influir en los rendimientos obtenidos.

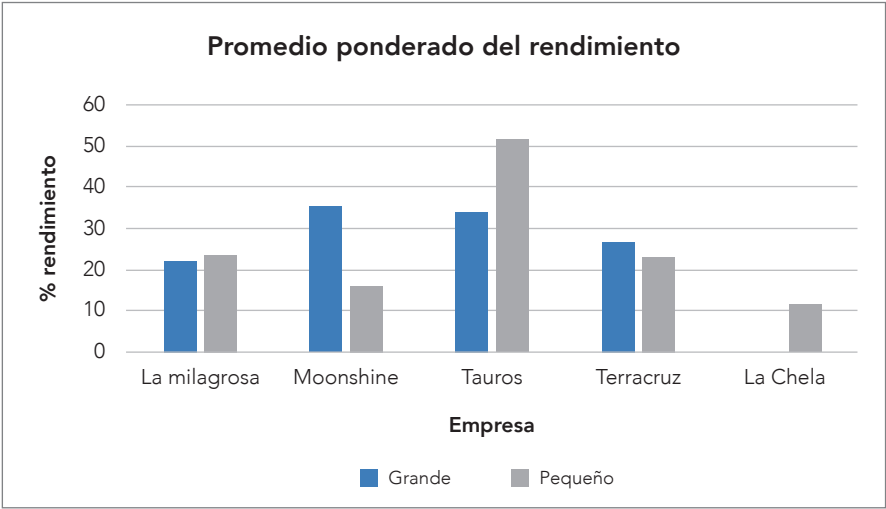


Figura 9. Rendimiento

Nota: elaboración propia.

Eficiencia de la carbonización hidrotermal

Como se puede evidenciar en la Tabla 2, el método de HTC ofrece ventajas significativas frente a la pirólisis y la carbonización lenta, especialmente en términos de eficiencia y costos. Mientras que los métodos convencionales requieren biomasa seca y altas temperaturas, el HTC utiliza biomasa húmeda y temperaturas moderadas, eliminando la necesidad de secado previo. Este proceso permite obtener hidrochar directamente, maximizando la sostenibilidad y reduciendo costos operativos.

Tabla 2. Comparación de métodos de producción de biochar.

Método	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia	Requerimientos adicionales	Ventajas del HTC
Pirólisis	400-700	Larga	Activación posterior	Alta porosidad, menos control
Carbonización lenta	300-500	Prolongada	Secado, activación posterior	Bajo costo, más energía lenta
HTC	180-250	Moderada	Ninguno	Menor costo, sin secado

Nota: elaboración propia.

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se puede concluir que el bagazo de cerveza, un subproducto abundante y comúnmente desechado en la industria cervecera, tiene un gran potencial como biomasa para la producción de carbón activado. Este enfoque no solo ofrece una alternativa innovadora a los métodos convencionales de obtención de carbón, sino que también contribuye a resolver los problemas ambientales derivados de la disposición de residuos industriales, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular con el ODS 12 (Producción y consumo responsables) y el ODS 13 (Acción por el clima). El aprovechamiento del bagazo de cerveza se enmarca en los principios de la economía circular, promoviendo el reciclaje y la revalorización de los subproductos industriales, reduciendo la dependencia de recursos naturales no renovables y disminuyendo la huella ecológica de la industria cervecera.

En cuanto al proceso de carbonización, se encontró que la carbonización hidrotermal (HTC) es el método más adecuado y sostenible para la producción de carbón activado. A diferencia de otros métodos como la pirólisis, que requiere altas temperaturas y procesos adicionales de activación para optimizar el material (Bridgwater, 2012; Mohan, Singh, & Singh, 2014), el HTC opera a temperaturas moderadas y permite utilizar biomasa húmeda sin necesidad de un proceso de secado previo. Esto no solo reduce significativamente el consumo de energía, sino que también minimiza los costos operativos, lo que convierte al HTC en una opción más económica y eficiente desde el punto de vista energético. Además, en comparación con la carbonización lenta, que se realiza a temperaturas más bajas y durante periodos prolongados, el HTC permite la producción directa de hidrochar, un material que conserva propiedades beneficiosas para el suelo y no requiere de tratamientos adicionales. Esto simplifica el proceso y lo hace más accesible para aplicaciones prácticas en la mejora del suelo y en estrategias de mitigación del cambio climático, contribuyendo así al ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres).

La activación química, en particular con ácido fosfórico, también demostró ser una opción eficaz, dado que su requerimiento energético es menor en comparación con la activación física. Aunque el ácido fosfórico tiene una naturaleza ácida, los carbones obtenidos presentaron un pH promedio de 5.4, lo que sugiere que la superficie del material es ligeramente ácida y

contiene principalmente grupos funcionales ácidos como carboxílicos y lactonas. Estas características son útiles en diversas aplicaciones de adsorción, especialmente aquellas que requieren la interacción con compuestos ácidos. Además, los resultados de la caracterización mostraron que el carbón activado obtenido tenía un bajo contenido de humedad, lo que optimiza su capacidad de adsorción, y un porcentaje reducido de cenizas, lo que indica una alta pureza del material. Este perfil de baja humedad y baja cantidad de cenizas mejora su eficacia en aplicaciones industriales, haciendo que el material sea adecuado para ser utilizado en sectores como la farmacéutica, la industria alimentaria y el tratamiento ambiental.

Otro aspecto relevante es que, debido a la proporción equilibrada de grupos ácidos y básicos en la superficie del carbón activado, el material presenta versatilidad en su capacidad de adsorción, lo que le permite interactuar tanto con compuestos ácidos como con compuestos básicos. Esta característica es valiosa para aplicaciones de tratamiento de aguas contaminadas por sustancias de diversos pH, así como para la adsorción de gases industriales, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en la purificación del aire y la remediación de aguas residuales. En conjunto, este enfoque no solo ofrece una solución eficiente para el manejo de residuos industriales, sino que también presenta un material de alta calidad con aplicaciones en sectores clave, lo que contribuye al fortalecimiento de las prácticas sostenibles y apoya la transición hacia procesos industriales menos dependientes de materias primas no renovables, alineándose con el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura).

A pesar de los avances, se recomienda que futuras investigaciones profundicen en la caracterización específica del carbón activado obtenido, con el fin de determinar con mayor precisión sus aplicaciones en sectores industriales como el farmacéutico, alimentario y de tratamiento de aguas. La falta de una mayor cantidad de caracterizaciones limitó la precisión con la que se pudo definir el uso ideal del material, lo que impidió un enfoque más específico hacia industrias objetivo. Además, dada la naturaleza innovadora de este proyecto, la escasa bibliografía directamente aplicable obligó a adaptar metodologías de otras áreas similares, lo que implicó realizar varios ajustes experimentales en los procedimientos. Si bien este enfoque permitió avanzar, una base teórica y metodológica más robusta habría sido ideal para aumentar la precisión y reducir la dependencia de adaptaciones en el proceso experimental.

Referencias

- Achury, C. (2008). *Activación de carbón activado a partir de cáscara de coco: Obtención por medio de activación química y física*. Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/23588/u303042.pdf?seque nce=1&isAllowed=y>
- ALAN. (2000). Significado nutricional de los compuestos fenólicos de la dieta. *ALAN*, 50(1). https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222000000100001
- Bernal, C., Ligia, S., López, U., Mesa, M., & Urrego, S. (2007). *Caracterización de materiales sólidos porosos mediante termoporometría*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Bhabendra, K., & Sandals, N. K. (1998). Effect of different oxidizing agent treatments on the surface properties of activated carbons. *Carbon*, 37, 1323-1332. doi:10.1016/S0008- 6223(98)00043-1
- Boehm, H. P. (1994). Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons. *Carbon*, 32(5), 759-769. doi:10.1016/0008-6223(94)90031-0
- Bricio, E. E. (2010). *Síntesis y caracterización de carbón activado a partir de bagazo de tequila Azul Weber*. Universidad de Guanajuato. https://www.researchgate.net/publication/281155060_Sintesis_y_caracterizacion_de_carbon_activado_a_partir_de_bagazo_de_tequila_Azul_Weber
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Cabrera, P. E. (2019). *Obtención de carbón mediante carbonización hidrotermal utilizando bagazo de caña*. Repositorio Digital UCE. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/17962>
- Cortés, J. C., Giraldo, L., García, A. A., García, C., & Moreno, J. C. (2008). Oxidación de un carbón activado comercial y caracterización del contenido de grupos ácidos superficiales. *Revista Colombiana de Química*, 37(1), 55-65. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28042008000100005&lng=en&tlng=es
- Frontiers. (2020). Bioprocessing of brewers' spent grain enhances its antioxidant activity: Characterization of phenolic compounds and bioactive peptides.

- Frontiers in Microbiology*, 11, 1831. <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2020.01831/full>
- García, M. (2017). Los residuos de cerveza como fuente de antioxidantes naturales. <https://core.ac.uk/download/pdf/157811264.pdf>
- Giraldo, L., García, V., & Moreno, J. C. (2008). Caracterización superficial en fase gas y líquida de carbones activados. *Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes*, 27, 7-16.
- Global Forest Resources Assessment. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020*.
- González-García, P. (2018). Carbón activado a partir de precursores lignocelulósicos: Una revisión de los métodos de síntesis, técnicas de caracterización y aplicaciones. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1393-1414.
- Kumar, A., & Khatri, V. (2018). A review on the production of biochar from agricultural residues. *Journal of Cleaner Production*, 198, 327-345. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.156>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). Biochar for environmental management: An introduction. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (pp. 1-12). Earthscan.
- Lopes, G. K. P., Zanella, H. G., Spessato, L., Ronix, A., Vieron, P., Fonseca, J. M., Yokoyama, J. T. C., Cazetta, A. L., & Almeida, V. C. (2021). Steam-activated carbon from malt bagasse: Optimization of preparation conditions and adsorption studies of sunset yellow food dye. *Arabian Journal of Chemistry*. doi:10.1016/j.arabjc.2021.103001
- Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Carbón activado*. Elsevier. doi:10.1016/B978-008044463-5/50019-4
- Mohan, D., Singh, P., & Singh, V. K. (2014). Pyrolysis of wood and agricultural residues for biochar: A review. *Energy & Fuels*, 28(11), 7148-7166. <https://doi.org/10.1021/ef5011162>
- Nieto, E. D. (2020). *Valorización de residuos biomásicos mediante tratamiento hidrotermal*. Conama. <http://www.conama.org/conama/download/files/conama2020/CT%202020/5447.pdf>
- Olea, C., y Morales, J. (2016). *Estudio de la actividad antioxidante y potencial capacidad citotóxica en células leucémicas de la línea HL-60 de nuevos compuestos derivados*

- de ácido hidroxicinámico. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/142474>
- Piai, L., Dykstra, J., Adishakti, M., Blokland, M., Langenhoff, A., & Van der Wal, A. (2019). Diffusion of hydrophilic organic micropollutants in granular activated carbon with different pore sizes. *Journal of Water Research*, 518-527. doi:10.1016/j.watres.2019.06.012
- Rivas, C. (2018). Piensa un minuto antes de actuar: Gestión integral de residuos sólidos. *Ministerio de Ambiente*. <https://www.mincit.gov.co/getattachment/c957c5b4-4f22-4a75-be4d-73e7b64e4736/17-10-2018-Uso-Eficiente-de-Recursos-Agua-y-Energi.aspx>
- Rodríguez-Reinoso, F., Marsh, H., & Heintz, E. (1997). *Introduction to carbon technologies*. Publicaciones Universidad D'Alicante. <https://publicaciones.ua.es/es/catalogo/introduction-to-carbon-technologies/978-84-7908-317-5>
- Saez, E., Ramos, M., Yates, M., Martín-Luengo, M., Martínez, A., ... Vega, L. (2014). Preparation, characterization and in vitro osteoblast growth of waste-derived biomaterials. *RSC Advances*, 4(25), 12630-12639.
- Valladolid, J. (2019). *Obtención de compuestos antioxidantes a partir de bagazo de cerveza*. Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/38445/TFG-I>
- Zhang, Y., Zeng, G., & Hu, X. (2018). Hydrothermal carbonization of biomass: A review on process conditions and biochar properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 568-581. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.008>

Capítulo 4

EL FUTURO DE LAS CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

The Future of Mini-Hydraulic Power Plants

Víctor Antonio Haché Pepén
Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra
(PUCMM-CSTA)

Resumen

Las centrales minihidráulicas se presentan como una solución viable a problemas energéticos en regiones aisladas geográficamente que cuentan con recursos hídricos, lo cual va en consonancia con los “Objetivos de Desarrollo Sostenible” (ODS), la mitigación a cambio climático y al estrés hídrico. Se muestra una comparativa entre la matriz energética colombiana y la dominicana, con énfasis en la hidroelectricidad a nivel macro.

Brevemente se explica el funcionamiento de las centrales hidráulicas convencionales y de las denominadas “a filo de agua”, junto con las mini y micro hidráulicas, acompañadas de las ventajas, los factores clave, las perspectivas futuras y las conclusiones de la investigación académica.

Palabras clave: minihidráulicas, energía, turbinas hidráulicas, innovación, desarrollo, ODS.

Introducción

Existen muchos desafíos globales, entre los cuales la escasez y el estrés hídrico que surgen por fenómenos climatológicos en distintos países alrededor del mundo, sumado a la creciente demanda energética actual y la proyectada para el futuro. En zonas donde se tienen recursos naturales aprovechables sin alterar el hábitat, como son saltos naturales, canales de riego en plantaciones agrícolas, entre otras, se pueden instalar turbinas minis o micro hidráulicas para aprovechar el caudal natural de agua y producir electricidad de forma limpia, sostenible y con mínimo impacto en la zona. A su vez, esto permitirá el desarrollo de nuevas tecnologías de turbinas portátiles mediante criterios que nacen de la innovación y la investigación, desde nuevos materiales o aleaciones y sus aportes con elementos electrónicos para la generación de electricidad mediante el movimiento de las aspas, es decir, aprovechando conceptos físicos y de ingeniería para dar soluciones puntuales cumpliendo con los ODS, sirviendo desde la academia hasta llegar a la sociedad.

La hidroelectricidad es la generación de la energía eléctrica producida a partir de la potencia hidráulica, tomando en cuenta que, a

su vez, la hidráulica es la rama de la Física que estudia el comportamiento de los líquidos o fluidos en función de sus propiedades.

Aproximadamente el 16% de la energía eléctrica mundial proviene de centrales hidroeléctricas. Cabe destacar que existe una diferencia entre la energía hidroeléctrica y la energía hidráulica, es que la primera se refiere a la generación de la electricidad mediante el movimiento del agua, mientras que la segunda se refiere al uso del agua para realizar trabajos mecánicos en general, no específicamente limitándose a la producción de electricidad.

En este contexto, el capítulo propone la implementación de sistemas de turbinas minihidráulicas en zonas específicas para la generación de energía limpia a partir de caudales de bajo volumen, sin necesidad de embalses. Para ello, se considera el cálculo de la capacidad de potencia requerida en regiones aisladas, el suministro eléctrico en zonas con recursos hídricos sin alterar el ecosistema y el desarrollo de turbinas hidráulicas más eficientes, ligeras y ambientalmente amigables, en coherencia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Desafíos actuales de la hidroelectricidad convencional

Actualmente se utilizan grandes centrales hidroeléctricas, lo cual repercute en el suministro eléctrico cuando los embalses tienen poca acumulación de agua producto de las sequías, lo que se traduce en racionalización de la electricidad y del suministro hídrico; todo eso sumado a los impactos ambientales enormes causados por los embalses y la presa, sin contar con las infraestructuras para distribución de la electricidad. A pesar de tener centrales hidroeléctricas, la electricidad no llega a todas las comunidades por problemas de interconexión con el sistema nacional, lo que permite que nazcan zonas o regiones aisladas de la electricidad, dentro del mismo país.



Figura 1. Listado de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Nota: Objetivos de Desarrollo Sostenible (2015). UNDP.

<https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals/energia-asequible-no-contaminante>

Los efectos del cambio climático, junto con el crecimiento poblacional, nos invitan a tomar medidas para satisfacer las demandas actuales y futuras, tanto de electricidad como del recurso hídrico, por lo que debemos utilizar tecnologías que permitan generar electricidad mediante el movimiento del agua, sin estancarla, manteniendo un caudal natural que no impactará negativamente en la región, pero tampoco estará interconectado a la red eléctrica nacional, porque es una red aislada que solamente suministra electricidad en la zona donde se encuentra la turbina.

Tecnologías hidráulicas y esquemas de generación

El esquema tradicional de una central hidroeléctrica contiene los siguientes elementos: un embalse, una presa, una turbina, un generador, transformador, tendido eléctrico; en el caso de la otra tecnología, la denominada a “filo de agua”, se toma una ruta de desvío mediante un azud del cauce hacia la cámara de generación, que es donde se encuentra la turbina.

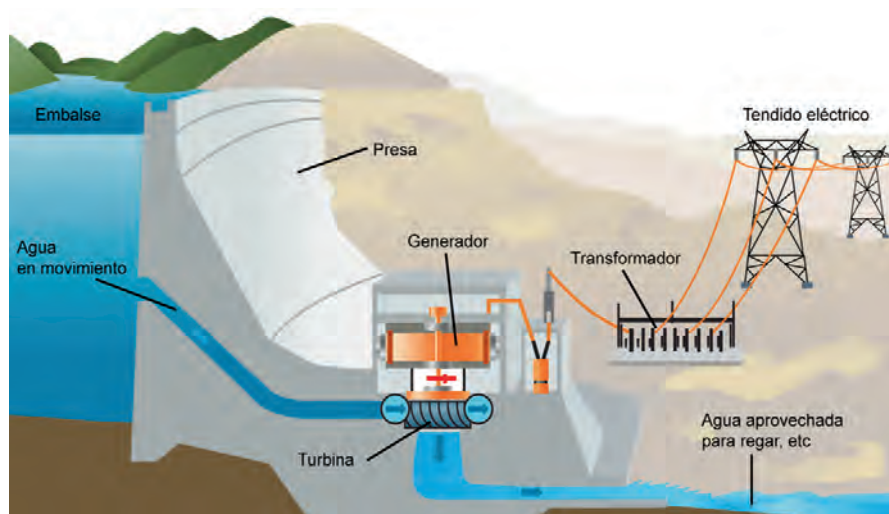


Figura 2. Esquema de una central o planta hidroeléctrica

Nota: Sepulveda, L. (2024, October 19). *Energía hidráulica: Un pilar sostenible en la matriz eléctrica dominicana*. EHPLUS+.

<https://ehplus.do/energia-hidraulica-un-pilar-sostenible-en-la-matriz-electrica-dominicana/>



Figura 3. Esquema de una central o planta hidroeléctrica a filo de agua

Nota: Artavia, P. (n.d.). *Energía Hidráulica*.

https://luzydiversion.cnfl.go.cr/recursos/curso1/Recurso3/energa_hidrulica.html

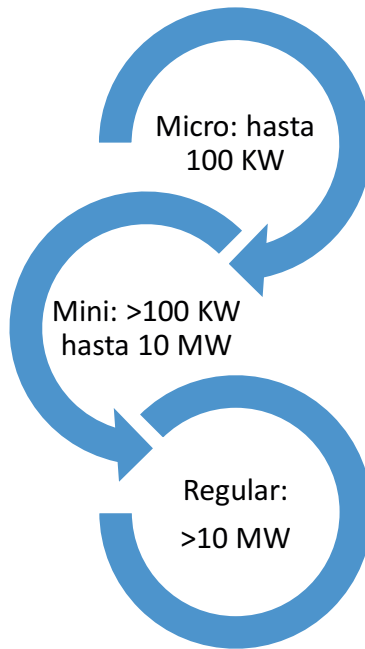


Figura 4. Clasificación de las centrales hidroeléctricas según su potencia

Fuente: elaboración propia (2025).

Contexto energético y comparativa regional

Contexto global

La escasez de agua afecta a más de un 40% de la población mundial, una cifra alarmante que crecerá con el aumento de las temperaturas globales y otros fenómenos producto del cambio climático. El futuro de las centrales minihidráulicas se presenta prometedor, impulsado por su capacidad para generar energía renovable a pequeña escala y su adaptabilidad a las necesidades locales.

Estas instalaciones que aprovechan la energía primero potencial y luego cinética del agua, ofrecen múltiples ventajas que las posicionan como una opción viable en la transición hacia un modelo energético más sostenible.

Datos Eléctricos Importantes en Colombia

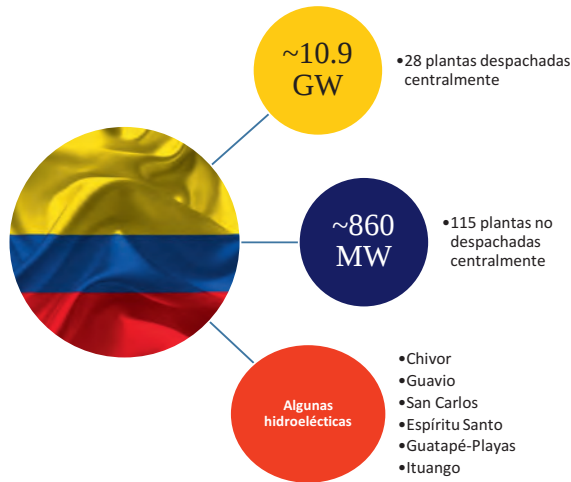


Figura 5. Algunos datos de centrales hidroeléctricas en Colombia

Fuente: elaboración propia (2025).

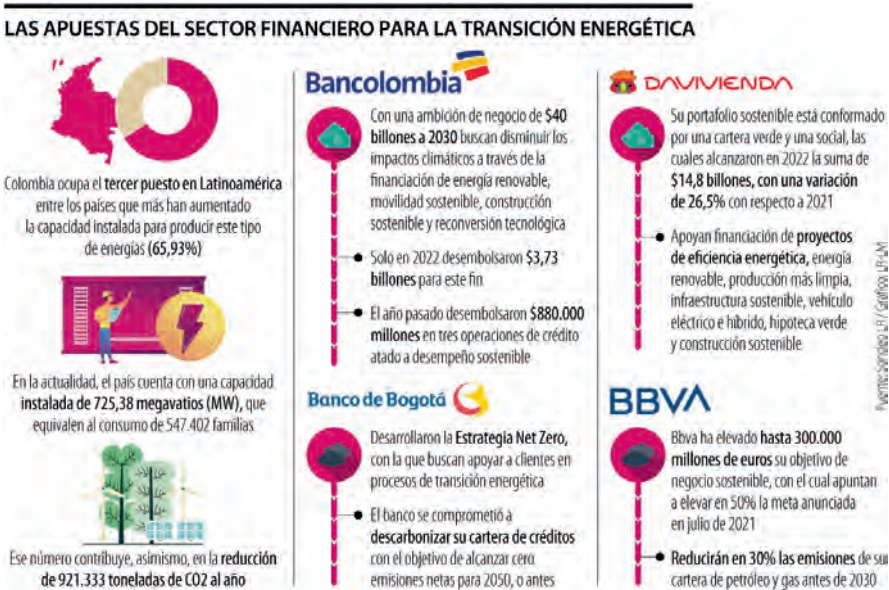


Figura 6. Matriz energética colombiana

Nota: Acosta (2019).

Datos Eléctricos Importantes en República Dominicana

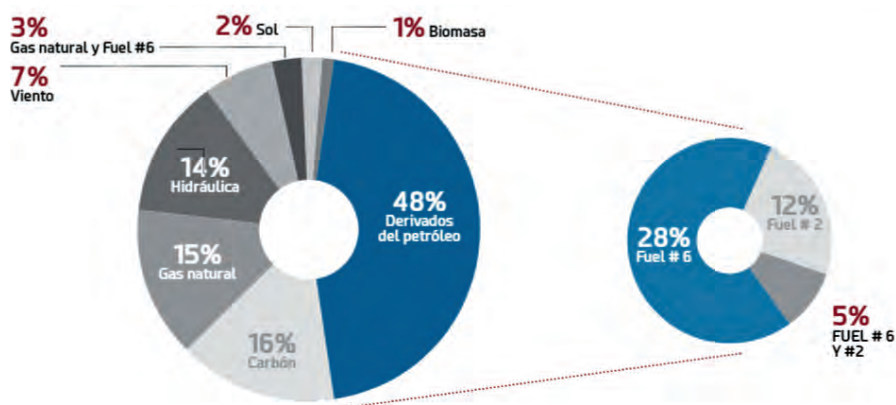


Figura 7. Capacidad instalada por fuente primaria de energía

Nota: IADIE – Asociación Dominicana de la Industria Eléctrica (2019).

En República Dominicana se cuenta con 34 presas, de las cuales se destacan: Valdesia, Tavera, Bao, Sabana Yegua y Hatillo, por ser las más relevantes en operatividad, complejidad y ubicación estratégica. En cuanto a proyectos aislados se contabilizan 50 entre mini y micro hidroeléctricas, especialmente en zonas montañosas.

Ventajas de las centrales minihidráulicas

1. **Costos iniciales y mantenimiento:** requieren una inversión inicial relativamente baja, presentan costos de operación y mantenimiento reducidos en comparación con las grandes instalaciones hidroeléctricas.
2. **Impacto ambiental:** no genera residuos contaminantes, ni emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Su impacto sobre flora y fauna es limitado, lo que contribuye a la conservación de ecosistemas locales.
3. **Generación distribuida:** al estar ubicadas cerca de los puntos de consumo, minimizan las pérdidas de electricidad durante el transporte, lo que mejora la eficiencia del sistema eléctrico en general.

4. Flexibilidad y adaptabilidad: las minicentrales pueden ser instaladas en diversas configuraciones, ya sea desviando el agua de ríos o utilizando embalses. Esto les permite adaptarse a los diferentes entornos y necesidades energéticas locales.
5. Sostenibilidad económica: fomentan el desarrollo económico local al crear empleo en áreas rurales y contribuir a la economía regional.

Perspectivas futuras

Como cita el escritor Gabriel García Márquez: “La vida no es sino una continua sucesión de oportunidades para sobrevivir”, lo que nos permite construir las perspectivas de avances mediante las oportunidades académicas para innovación y desarrollo tecnológico, aplicando nuevos materiales y pruebas de eficiencia, durabilidad y productividad ; evaluación y mejora de los modelos actuales de turbinas, diseño y construcción de modelos más eficientes, solamente por citar algunos puntos, los cuales van a forzar a la redacción de políticas energéticas que marcan el uso de los ODS.



Figura 8. Perspectivas Futuras

Nota: elaboración propia (2025).

El desafío de almacenar energía renovable

Como respuesta a este gran reto, sobre todo de la hidroelectricidad, la compañía española Acciona presentó un proyecto de una central hidráulica con turbinas, bombas hidráulicas y dos embalses ; el objetivo es que se realice el juego bomba-turbina, en donde el embalse superior vierte el agua hacia la cámara de generación, luego desde el embalse inferior o contraembalse se bombea el agua al superior; la electricidad se produce al mover unas turbinas Pelton verticales, mientras que el excedente eléctrico se utiliza para poder bombear el agua al embalse superior para almacenar energía en momentos de necesidad, con lo que favorece un mejor aprovechamiento del recurso hídrico. Este proyecto da electricidad equivalente para abastecer a 16.000 hogares, cumple con los ODS 7: energía asequible y no contaminante junto con ODS 13: acción por el clima. La central hidráulica reversible tiene una capacidad de 88,85 MW, con un caudal turbinable de aproximadamente 9,9 metros cúbicos por segundo, se encuentra en Canfranc, Huesca, España. Similar a esta se encuentran otras reversibles en diversas zonas, como en el caso de Islas Canarias.

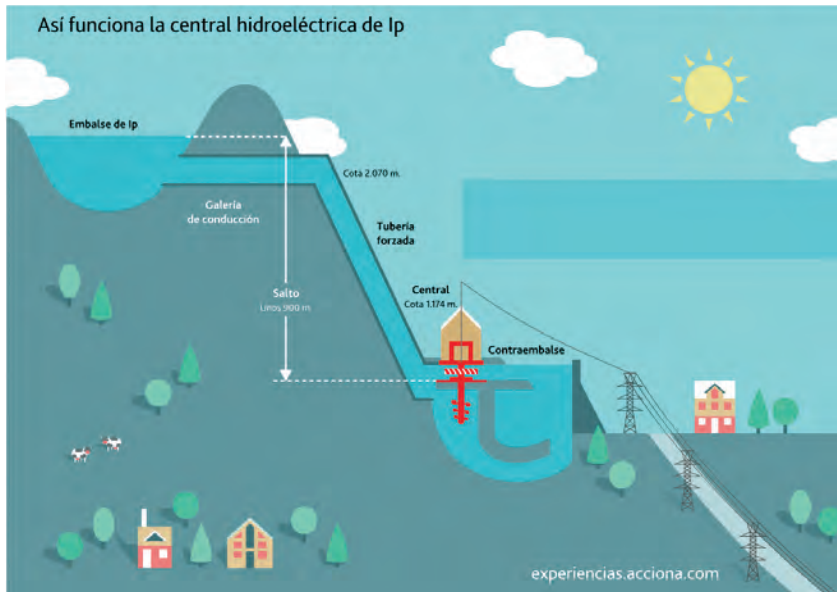


Figura 9. El desafío de almacenar energía renovable

Nota: Acciona (2020). ACCIONA | Business as unusual.
<https://www.acciona.com/es/proyectos/central-hidroelectrica-de-ip/>

Factores que influyen en el costo

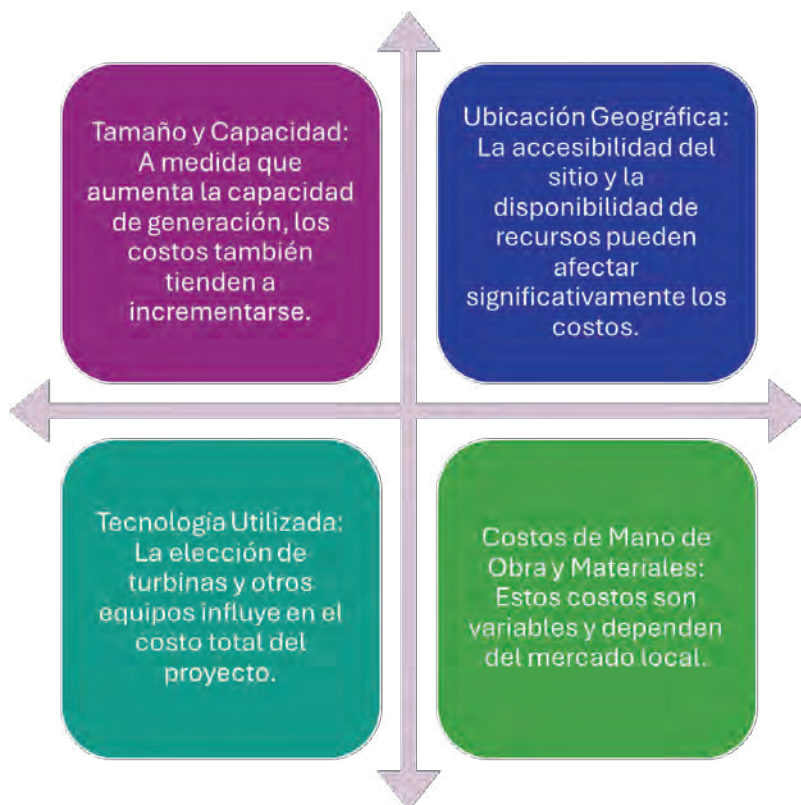


Figura 10. Factores que influyen en el costo

Nota: elaboración propia (2025).

El gráfico anterior resume los aspectos básicos que influyen en el costo, porque dependiendo de la capacidad y el tamaño de la generación se determinará el costo de materiales que a su vez depende de la elección de la tecnología de los equipos para la fase de construcción; posteriormente entra la fase de costo de mantenimiento operacional de forma preventiva y correctiva, sin ser menos influyente la ubicación geográfica, porque esta determina las rutas de transporte de todos los materiales y del personal para el proyecto.

La parte de materiales depende críticamente de la fabricación local o si son materiales que se importan al país, en cualquiera de los casos respetando

las normativas técnicas para cumplir los estándares nacionales e internacionales de calidad en los equipos y sus componentes.

Retos a considerar

- a) El costo inicial promedio de una central minihidráulica puede variar considerablemente dependiendo de varios factores, como la ubicación, el tamaño, la capacidad de generación y la tecnología utilizada. Sin embargo, se estima que el costo de instalación para estas centrales oscila entre USD\$1.000 y USD\$5.000 por kilovatio instalado.
- b) Este rango es generalmente más bajo que el de las grandes centrales hidroeléctricas, que pueden costar aproximadamente USD\$6.000 por kilovatio instalado.
- c) El tiempo necesario para construir una central minihidráulica puede variar considerablemente según varios factores, como la complejidad del proyecto, la ubicación y la capacidad de generación. Sin embargo, en términos generales, la construcción de una central minihidráulica suele tardar entre 6 meses y 2 años si es compleja, mientras que una simple puede estar en rango de 1-3 meses.
- d) Gestión del recurso de generación mediante una auditoria energética, monitoreo y gestión del consumo energético de forma responsable.

Minigeneradores de energía hidráulica



Figura 11. Generador minihidráulico

Nota: minigeneradores de energía hidráulica. (2022). YouTube.
<https://youtu.be/uh6hEchRyPo>

Existen diversos prototipos de minigeneradores; el de la figura anterior es una obra de un ingeniero japonés, llamado Masaya Sumino, quien construyó un sistema portátil que tiene aproximadamente 18 Kg. En el enlace del vídeo de Youtube puede verse el contenido que resumió el canal DW de este invento y su aporte para solucionar problemas energéticos y elementos que hemos comentado en el transcurso de la investigación.

Conclusiones

Con un adecuado mantenimiento y atención a las condiciones operativas, una central minihidráulica puede funcionar eficientemente durante varias décadas, contribuyendo a la generación sostenible de energía (rango entre 30 y 50 años).

Aunque las centrales minihidráulicas son generalmente más rápidas de construir que las grandes instalaciones hidroeléctricas, el tiempo exacto dependerá de las características específicas del proyecto y del entorno en el que se desarrolle.

Destacan por su coste accesible, bajo impacto ambiental, flexibilidad operativa y capacidad para fomentar el desarrollo local, lo que las posiciona como una solución efectiva en el panorama energético actual, que se pueden emplear tanto en Colombia como en República Dominicana.



Figura 12. Conclusiones y comentarios

Nota: elaboración propia (2025).

Desde las universidades se debe incentivar la investigación, desarrollo e innovación para mejorar las tecnologías actuales en energías renovables. Para esto es necesario que se conozcan principios CSA-IRA y se actualicen modelos pedagógicos en los que se implementen con aprendizaje basado en proyectos (ABP) y aprendizaje basado en servicios (ABS), los cuales responden a los ODS y a las problemáticas puntuales de las regiones evaluadas dentro de los países indicados, respetando los recursos naturales y contribuyendo en la mejora de la calidad de vida de las personas.

Y recordando que el clásico genio universal, Leonardo Da Vinci, dijo: “El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza”.

Referencias

- ADIE – Asociación Dominicana de la Industria Eléctrica. (2019). *Informes – ADIE*. https://www.adie.org.do/informes-y-estudios/informes-adie/#flip-book-df_537/9/
- ArcGIS Web Application. (2024). <https://www.mapas.cne.gob.do/>
- Artavia, P. (n.d.). *Energía hidráulica*. https://luzydiversion.cnfl.go.cr/recursos/curso1/Recurso3/energa_hidrulica.html
- Artavia, P. (n.d.). *Energía Hidráulica*. Centro Virtual de Diseño y Desarrollo - INA-PIDTE. https://www.ina-pidte.ac.cr/pluginfile.php/82251/mod_resource/content/1/energa_hidrulica.html
- Cache://www.iberdrola.com/sostenibilidad/Que-es-energia-hidroelectrica - Google search. (n.d.). <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-energia-hidroelectrica>
- Comisión Nacional de Energía. (2015). *Estadísticas Energéticas – Comisión Nacional de Energía*. <https://www.cne.gob.do/estadisticas-energeticas/>
- EC13, T. (2020). Minicentrales hidroeléctricas: ¿energía del pasado o apuesta del futuro? *elconfidencial.com*. https://blogs.elconfidencial.com/economia/tribuna/2020-08-27/minicentrales-hidroelectricas_2726439/
- EcoInventos. (2019). *Generador Móvil de Energía Hidráulica Ultrapequeño, Tienes Agua Tienes Energía*. <https://ecoinventos.com/generador-movil-energia-hidraulica-ultrapequeno/>
- Editorial La República S.A.S. (2019). La apuesta por las energías renovables. *Diario La República*. <https://www.larepublica.co/analisis/amytkar-d-acosta-m-557896/la-apuesta-por-la-energias-renovables-2860710>
- Editorial La República S.A.S. (2023). La transición energética, UNO de los compromisos principales del sector financiero. *Diario La República*. <https://www.larepublica.co/especiales/convencion-bancaria-2023/la-transicion-energetica-uno-de-los-compromisos-principales-del-sector-financiero-3638572>
- European Environment Agency. (2023). *Un futuro basado en las energías renovables*. <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2022/articulos/un-futuro-basado-en-las>
- FAO, CSA. (2014). *Principios IRA*. Principios IRA Universidad. <https://www.principiosiaruniversidad.com/principios-ira>

- Fuentes no Convencionales de Energía Renovable - FNCER. (2024). <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/fuentes-no-convencionales-de-energ%C3%ADa-renovable-fncer/>
- Grupo de Investigación Gesplan. (2024). Grupo de Investigación GESPLAN de la Universidad Politécnica de Madrid. <https://www.ruraldevelopment.es/index.php/es>
- Hydropower research. (2024). National Renewable Energy Laboratory (NREL) NREL. <https://www.nrel.gov/water/hydropower-research.html>
- IP. (2020). ACCIONA | Business as unusual. <https://www.acciona.com/es/proyectos/central-hidroelectrica-de-ip/>
- Munilla, V. (2024). Energía hidráulica: Qué es, Cómo funciona Y ventajas. *geoenciclopedia.com*. <https://www.geoenciclopedia.com/energia-hidraulica-que-es-como-funciona-y-ventajas-1022.html>
- National Geographic. (2010) *¿Qué es la energía hidroeléctrica?* <https://www.national-geographic.es/medio-ambiente/energia-hidroelectrica>
- National Renewable Energy Laboratory (NREL) NREL. (2024). *New NREL tool estimates lifetime greenhouse gas emissions of the most well-established grid-scale energy storage technology*. <https://www.nrel.gov/news/program/2024/new-nrel-tool-estimates-the-lifetime-greenhouse-gas-emissions-of-grid-scale-energy-storage-technology.html>
- Objetivos de Desarrollo Sostenible. (2015). UNDP. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals/energia-asequible-no-contaminante>
- Presidencia de la República Dominicana. (2023). *INDRHI destaca relevancia de obras para el máximo aprovechamiento de los recursos hídricos del país*. <https://presidencia.gob.do/noticias/indrhi-destaca-relevancia-de-obras-para-el-maximo-aprovechamiento-de-los-recursos-hidricos>
- Sepúlveda, L. (2024). *Energía hidráulica: un pilar sostenible en la matriz eléctrica dominicana*. EHPLUS+. <https://ehplus.do/energia-hidraulica-un-pilar-sostenible-en-la-matriz-electrica-dominicana/>
- UNDP. (2022). *Más de 50 micro hidroeléctricas a nivel nacional permiten acceso a energía eléctrica de manera sostenible*. <https://www.undp.org/es/dominican-republic/noticias/mas-de-50-micro-hidroelectricas-nivel-nacional-permiten-acceso-energia-electrica-de-manera-sostenible>

YouTube. (2020). *Cómo construimos la MINI central HIDROELÉCTRICA - generador de energía hidráulica*. <https://youtu.be/a37rLkgGkT4>

YouTube. (2022). *Mini generadores de energía hidráulica*. <https://youtu.be/uh6hE-chRyPo>

YouTube. (2022). *Mini generadores de energía hidráulica*. <https://youtu.be/uh6hE-chRyPo>

Capítulo 5

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LOS ÍNDICES VEGETATIVOS E HIDROLÓGICOS DE LOS DOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ

*Multitemporal Analysis of Vegetation
and Hydrological Indices of the Two Water
Supply Systems in the City of Bogotá*

Laura Mercedes Arteaga Rojas
Politécnico Grancolombiano

José Roncancio Barragán
Politécnico Grancolombiano

Resumen

El capítulo presenta un análisis multitemporal de los índices vegetativos e hidrológicos en dos sistemas principales de abastecimiento de agua de la ciudad de Bogotá: el embalse de Chuza y el complejo del Sumapaz, que incluye la laguna Los Tunjos y los embalses Chisacá y La Regadera. El estudio se basa en el procesamiento y análisis de imágenes satelitales adquiridas entre los años 1984 y 2024, empleando datos de los satélites LANDSAT, SENTINEL y MODIS, así como el cálculo de índices normalizados de vegetación. A partir de técnicas de procesamiento digital, modelos estadísticos y análisis de regresión, se identifican patrones, tendencias históricas y proyecciones asociadas a la cobertura vegetal y a las condiciones hidrometeorológicas. Los resultados evidencian diferencias en el comportamiento vegetativo y en la estabilidad hídrica de los sistemas analizados, aportando información relevante para la comprensión de la dinámica ambiental y la gestión del recurso hídrico en la capital colombiana.

Introducción

El agua es un recurso esencial para la vida y el desarrollo socioeconómico, desempeñando un papel clave en la generación de energía, la producción de alimentos y la interacción entre la naturaleza y la sociedad. La gestión sostenible del agua es fundamental para aumentar la resiliencia de las sociedades y los ecosistemas y reducir las emisiones de carbono (UN-Water, 2020).

El número y la duración de las sequías aumentaron un 29% después del año 2000. La mayor parte de las muertes relacionadas con la sequía ocurrieron en África (ONU, 2020).

La ONU (2024) hace mención que tan solo el 0,5% del agua de la Tierra es agua dulce utilizable y disponible, y el cambio climático está afectando peligrosamente a ese suministro. En los últimos 20 años, las reservas de agua terrestre (incluida la humedad del suelo, la nieve y el hielo) han disminuido a un ritmo de 1 cm por año (ONU, 2024).

En Colombia, un tercio de la población urbana está afectada por el estrés hídrico, presentando inseguridad hídrica en todo su territorio durante las dos últimas décadas, reflejando problemas de “exceso, escasez y

contaminación” no abasteciendo a la biodiversidad de los ecosistemas y a la población. El mayor número de sequías e inundaciones aumentó por la frecuencia de los fenómenos del niño y la niña, resultando una pérdida del 60 % en los últimos 50 años (Banco Mundial, 2020).

Asimismo, la cobertura del abastecimiento de agua gestionado de manera segura llegó al 73 % a nivel nacional (el 40 % en las zonas rurales) y la cobertura del saneamiento gestionado de manera segura a tan solo el 17 % (Banco Mundial, 2020).

El sistema de abastecimiento de agua de Bogotá consta de embalses, parques de conservación natural, lagunas, etc. La base natural del territorio que forman las cadenas montañosas que circundan en el macizo de Chingaza y el páramo de Sumapaz son las principales fuentes de abastecimiento para Bogotá y la Región.

El sistema Chingaza, declarado reserva natural por el gobierno nacional, es fundamental para el suministro de agua potable en Bogotá y 11 municipios de Cundinamarca. Incluye el embalse de Chuza, con una capacidad de 220 millones de m^3 , y un sistema de 38 kilómetros de túneles y tuberías que conducen el agua a la Planta de Tratamiento Wiesner, ubicada en La Calera. (Canal Capital, 2023). La Planta Wiesner trata 12.000 litros de agua por segundo mediante procesos de filtración y regulación fisicoquímica, asegurando agua de calidad para su distribución a 10 millones de habitantes.

El embalse tiene una capacidad adicional de 67 millones de m^3 . El ecosistema circundante, situado a 3.500 metros sobre el nivel del mar, alberga más de 1.000 especies de flora, incluyendo cinco especies de frailejones y árboles como encenillos. Además, el área fomenta el ecoturismo en zonas protegidas, destacando su biodiversidad en los páramos y bosques altoandinos (Caracol Televisión, 2022).

El sistema de abastecimiento del Sumapaz, el primer sistema de abastecimiento de agua al sur de la ciudad, compuesta por la laguna los Tunjos y los embalses Chisacá y La Regadera, cuenta con las plantas de tratamiento La Laguna de 0,5 m^3/s , El Dorado de 1,6 m^3/s , Yomasa de 0,025 m^3/s y Vitelma de 1,5 m^3/s . (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2023). Conectada con la planta El Dorado llegan 1.600 litros por segundo y a otras plantas construidas para las personas que habitan al sur oriente

de la ciudad. Cuenta con 260 especies y variedad de aves, anfibios y reptiles (Conservamos la Naturaleza, 2023).

Y la laguna de Chisacá, que es centro de diversidad, provee agua alrededor del 30% de la población colombiana, beneficiando a aproximadamente 15 millones de personas. Los ecosistemas de páramo son los responsables de suministrar el 100% del recurso hídrico a las cuencas hidrográficas, garantizando así el abastecimiento de agua para la población (Alcaldía Local de Sumapaz, 2024).

El Plan Distrital de Desarrollo – Bogotá Camina Segura, planteado por la alcaldía de Carlos Fernando Galán, promueve la conservación de los ecosistemas y el aumento de la resiliencia al cambio climático de la ciudad de Bogotá (Secretaría Distrital de Planeación, 2024).

En ese sentido, el aporte desde los proyectos educativos planteados desde el aula de clases para el programa de ingeniería de sistemas del Politécnico Grancolombiano se propone el estudio de la *data set* de datos satelitales, del cuidado de los ecosistemas, que permita concientizar, socializar y promover la toma de decisiones a los estudiantes sobre las problemáticas actuales de la ciudad.

De ese modo, el objeto de estudio actual se sitúa en dos sistemas principales de abastecimiento de agua de la capital. Durante el año 2024, el Acueducto de Bogotá hace un llamado urgente a la ciudadanía sobre la crítica situación del agua en la capital colombiana vivida durante el año 2024. Se analiza mediante imágenes satelitales las condiciones históricas de los sistemas de abastecimiento hídrico y vegetativo del embalse Chuza, que bajó a un 33,2% y el complejo de lagunas y embalses del Sumapaz se mantienen estables entre el 91% y 95% en sus niveles, generando una alerta significativa sobre la escasez de agua en la región (Caracol Radio, 2024).

Este análisis científico, basado en tecnología satelital, muestra la situación histórica de las principales fuentes de agua que abastecen a más de 10 millones de habitantes en Bogotá y sus alrededores. Las imágenes proporcionan evidencia objetiva de la reducción en los niveles de agua, respaldando la necesidad de tomar medidas inmediatas para enfrentar esta crisis hídrica. Misma situación vivida en el año 1992 en el país, cuando el fenómeno del Niño obligó a implementar cortes de agua y energía hasta

por 8 horas diarias, llegando incluso a medidas extremas como el bombardeo de nubes para provocar lluvia (Acueducto, 2023).

Importancia de los índices vegetativos en sistemas hídricos

Las tecnologías satelitales permiten recopilar datos claves como temperatura, precipitaciones, urbanización, cobertura del suelo y radiación solar, entre otros. Estos datos son transmitidos a estaciones terrestres, procesados en imágenes y posteriormente migrados a geoportales, tanto gratuitos como de pago. Mediante el análisis de bandas espectrales RGB e infrarrojas, se obtienen índices vegetativos e hídricos normalizados (NDVI y NDWI), los cuales son evaluados históricamente en sistemas de información geográfica (SIG) y mapas geográficos para identificar tendencias y patrones relacionados con la disponibilidad de agua en los diferentes territorios estudiados. Ver Figura 1.

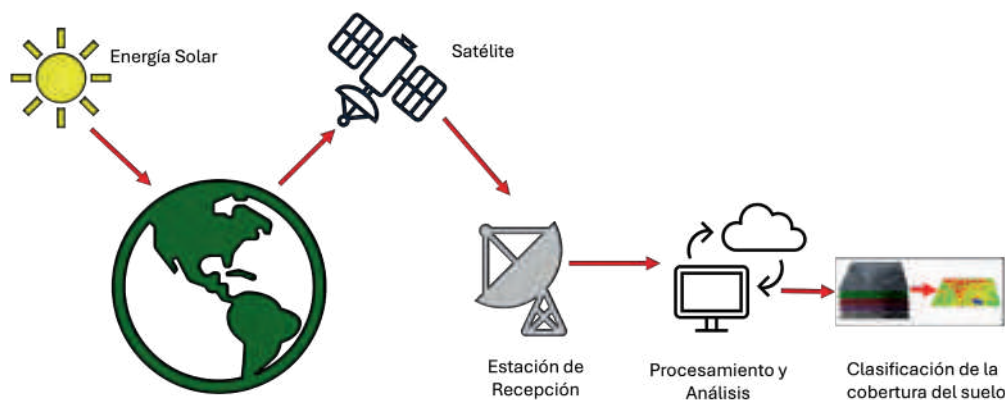


Figura 1. Monitoreo, captura, procesamiento y clasificación de la cobertura del suelo

Nota: elaboración propia.

En diferentes estudios realizados en el contexto de los cuerpos de agua, se han utilizado metodologías que combinan la teledetección satelital y el análisis de datos geoespaciales. Uno de esos estudios es en el puerto de Nueva York, que presenta un desafío para la teledetección debido a su hidrografía compleja y la fuerte influencia de las mareas. La necesidad de monitorear

la calidad del agua en esta región es crucial para evaluar la eficacia de las medidas de reducción de la contaminación y garantizar la salud del ecosistema acuático (Hellweger et al., 2004). Los métodos usados fueron comparar los datos terrestres de la Encuesta de Calidad del Agua del Puerto de Nueva York con imágenes de los sensores Landsat Thematic Mapper (TM) y Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Se emplearon análisis espaciales promediados en el tiempo para correlacionar las medidas de turbidez y la concentración de clorofila *a* con las reflectancias medidas por los sensores satelitales (Hellweger et al., 2004).

En el estudio se utilizaron algoritmos y modelos basados en imágenes de Landsat TM y MODIS de Terra. Con Landsat TM se logró correlacionar la turbidez determinada a partir de la profundidad de Secchi con la reflectancia roja en las regiones afectadas por los sedimentos del río Hudson. Además, la reflectancia roja se utilizó para identificar y cartografiar columnas de turbidez causadas por la escorrentía de lluvia y/o la resuspensión de mareas vivas en la bahía de Newark. También se encontró una correlación significativa entre la concentración de clorofila *a* y la relación entre la reflectancia verde y roja en el East River y Long Island Sound. Por otro lado, las estimaciones de clorofila *a* realizadas con el sensor MODIS de Terra no mostraron correlación con las observaciones terrestres y estuvieron sesgadas hacia valores bajos, resultando en una utilidad limitada para el puerto de Nueva York (Hellweger et al., 2004).

En el estudio se encontró una correlación significativa ($R^2 = 0.85$) entre la turbidez determinada a partir de la profundidad de Secchi y la reflectancia roja del Landsat TM en las áreas afectadas por los sedimentos del río Hudson, además de que la reflectancia roja del Landsat TM fue útil para identificar y cartografiar aumentos de turbidez en la bahía de Newark. En cuanto a la clorofila *a*, su concentración se correlacionó con la relación entre la reflectancia verde y roja del Landsat TM en el East River y Long Island Sound ($R^2 = 0.78$). Sin embargo, las estimaciones de clorofila *a* realizadas con MODIS de Terra no fueron fiables debido a su baja correlación con las observaciones terrestres (Hellweger et al., 2004).

Otra revisión bibliográfica que fundamenta el presente estudio se realizó en la provincia de Zhejiang, China. La monitorización de la calidad del agua en cuerpos de agua continentales, como ríos y embalses, presenta desafíos debido a la variabilidad de las fuentes de contaminación y la

falta de modelos de inversión genéricos que puedan aplicarse a diferentes aguas interiores. Este estudio aborda estos desafíos utilizando datos satelitales y técnicas de aprendizaje automático para crear modelos de inversión genéricos aplicables a las aguas interiores de Zhejiang Province, China (Zhao et al., 2024).

Los métodos que se usaron con los datos de las imágenes satelitales de Sentinel-2 y datos *in situ* de 311 estaciones de monitoreo automático sirvieron para construir un gran volumen de coincidencias entre los espectros de agua derivados del satélite y las concentraciones de parámetros de calidad del agua. Se aplicó un algoritmo de árboles de aumento de gradiente extremo (XGBoost) para desarrollar modelos de inversión de calidad del agua, que incluyen cinco parámetros: índice de permanganato (CODMn), nitrógeno total (TN), fósforo total (TP), nitrógeno amoniacal (NH₃-N) y turbidez (TUB). Los algoritmos y modelos son: el modelo de inversión desarrollados con el algoritmo XGBoost mostraron un rendimiento robusto en un conjunto de datos independiente, con coeficientes de correlación (*r*) de 0.74, 0.79, 0.84, 0.72, y 0.87, y errores cuadrados medios (RMSE) de 0.73 mg/L, 0.56 mg/L, 0.18 mg/L, 0.24 mg/L, y 0.29 NTU para CODMn, TN, TP, NH₃-N, y TUB, respectivamente. Comparaciones entre los valores recuperados por satélite y las observadas *in situ*.

Los resultados fueron que al aplicar estos modelos a las aguas interiores de Zhejiang Province se obtuvieron distribuciones mensuales de los parámetros de calidad del agua con una resolución de 10 m. Los patrones indicaron valores elevados en las regiones aguas abajo y valores disminuidos en las áreas aguas arriba. Los embalses mostraron buena calidad de agua en general, aunque algunas variaciones temporales en los valores promedio de los embalses y los valores en sitios específicos mostraron tendencias opuestas. Estos hallazgos proporcionan una referencia práctica para la construcción de modelos de inversión satelitales y un soporte técnico robusto para la vigilancia dinámica de la calidad del agua interior mediante teledetección (Zhao et al., 2024).

Metodología del análisis multitemporal

Para comprender el análisis del territorio se usaron imágenes satélites que permitieron identificar variables y realizar un análisis a través del

procesamiento digital de las condiciones de los territorios (Cuéllar y Pérez, 2023; Li et al., 2020b), por lo cual el área de estudio abordado en este artículo se enfocó en el embalse de Chuza y la laguna los Tunjos y los embalses Chisacá y La Regadera.

El modelo de análisis multitemporal de vegetación se describe bajo tres fases, Figura 2. La primera fase es la adquisición de los datos de acuerdo con el área de estudio; la segunda fase es el procesamiento y correlación de los datos fenológicos de la *data set* de las imágenes de los satélites LANDSAT 5,7 y 8, SENTINEL 2AY MODIS con los resultados *data set* de imágenes del satélite EOSDATA, *software* pago para obtener datos metrológicos; y la última fase de limpieza, normalización y aplicabilidad de modelos estadísticos para la visualización y pronósticos de datos futuros.

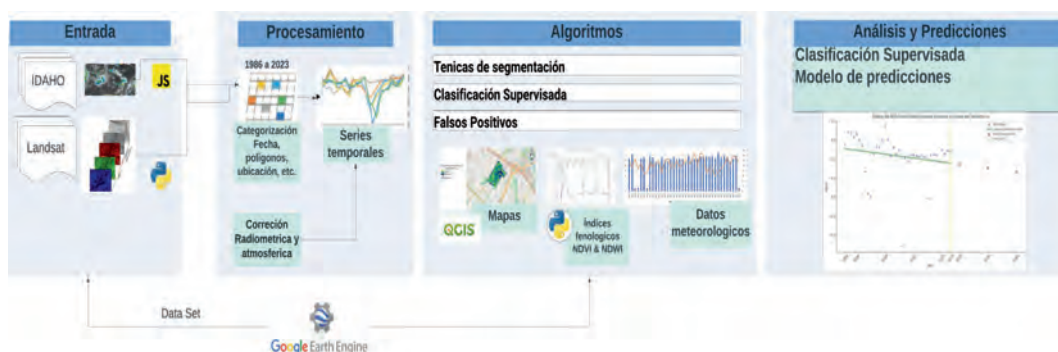


Figura 2. Modelo de análisis multitemporal de vegetación

Nota: elaboración propia.

El análisis de la *data set* satelital adquirida desde el año 1984 hasta el año 2024, se hace con el fin de estudiar cómo han cambiado las condiciones hídricas y vegetativas de los sistemas que abastecen a Bogotá, especialmente considerando la crisis actual del 2024, que ha llevado nuevamente a establecer medidas de racionamiento y ahorro del agua.

El estudio emplea algoritmos de combinación de bandas, técnicas de Machine Learning y modelos estadísticos de regresión lineal para identificar patrones, tendencias y realizar proyecciones futuras, analizando la dispersión de los datos en relación con los factores climáticos actuales. Este análisis resulta fundamental para entender y planificar el manejo del recurso

hídrico y vegetativo en la capital colombiana (Avtar et al., 2014a; Sanjay et al., 2019; Suárez et al., 2017).

Resultados del análisis multitemporal

En la primera fase se adquirieron las coordenadas en el polígono del Embalse de Chuza y la laguna los Tunjos y los embalses Chisacá y La Regadera.

En la Tabla 1 se representan las coordenadas, usando el geoportal (GEE) Google Earth Engine (<https://code.earthengine.google.com/>), que aloja un *data set* de imágenes captadas por diferentes satélites, almacenados en el servidor de GEE y contiene la interfaz de JavaScript que proporciona información de diferentes bandas, entre esas, las infrarrojas (SWIR), las rojas (NIR), entre otras, permitiendo combinarse entre sí obteniendo índices de vegetación como NDVI, EVI, SAVI mensuales desde 1984 hasta 2023. Ver tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de los territorios

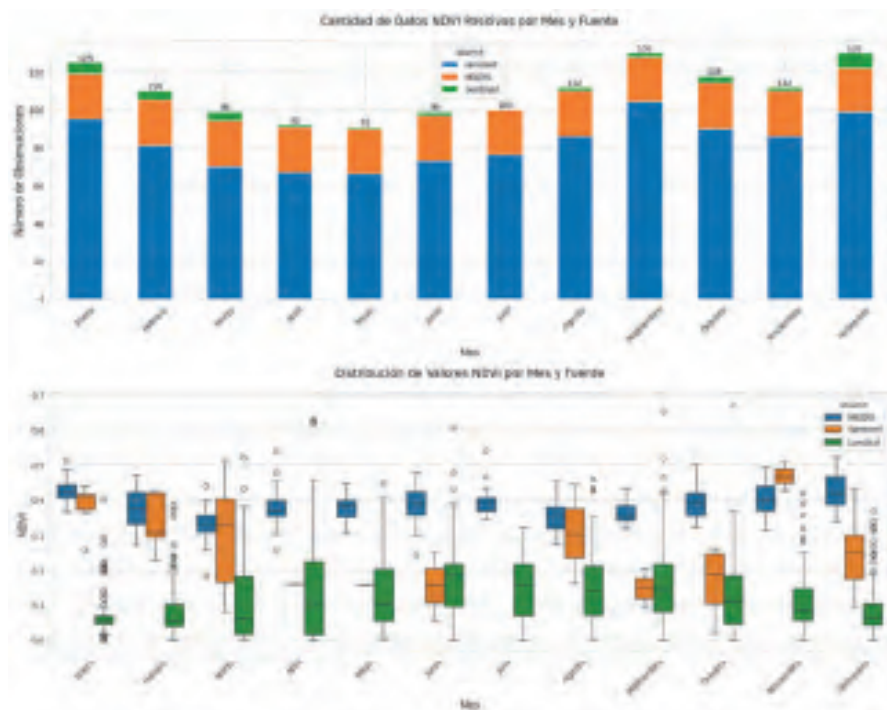
Lugar	Coordenadas Latitud	Coordenadas Longitud
Embalse de Chuza	4.520213909327315	-73.74000536441754
Laguna los Tunjos	4.2851767526624105	-74.20832249713372
Embalses Chisacá	4.38456064689678	-74.17172776374531
Embalse la Regadera	4.400409039879609	-74.14215790053365

Nota: elaboración propia.

Es relevante tener en cuenta los datos meteorológicos de los sistemas de abastecimiento de agua de la capital, debido a que la vegetación y el agua pueden cambiar sus condiciones, a causa de la temperatura y precipitaciones del ambiente. Para la selección de las escenas anuales se usaron desde el año 1984 hasta el año 2023, se tiene en cuenta la cantidad de nubosidad de un 10%. Los datos de satélite obtenidos que se procesan y codifican de acuerdo con los índices calculados de vegetación normalizada, vegetación mejorada, índice de vegetación ajustado por suelo, que se relacionan con los datos de temperatura y de precipitaciones.

En la segunda fase del estudio se analizaron 1.668 escenas satelitales, de las cuales se seleccionaron aquellas con valores de NDVI entre 0 y 1. La distribución final comprende 993 escenas del satélite LANDSAT, 38 del SENTINEL 2A y 288 del MODIS, totalizando 1.318 escenas válidas para el polígono del embalse Chuza. Este conjunto de datos abarca desde 1984 hasta 2024, con fechas de inicio variables según cada satélite.

Para el sistema hidrológico del Sumapaz, que incluye la laguna Los Tunjos y los embalses Chisacá y La Regadera (Figura 3A), se procesaron 950 escenas iniciales. Tras aplicar los criterios de valores máximos y mínimos del índice de vegetación, se obtuvieron 637 escenas válidas, distribuidas de la siguiente manera: 328 escenas de LANDSAT (con valores NDVI entre 0 y 1), 22 de SENTINEL 2 y 287 de MODIS. Los resultados que se presentan en la Figura 3B muestran los datos depurados de NDVI por meses, desde 1984 hasta 2023, obtenidos de los satélites LANDSAT 5, 7 y 8; SENTINEL 2A y MODIS, tanto para la Figura 3ª, el embalse Chuza, como para B, la laguna Los Tunjos y los embalses Chisacá y La Regadera.



(A)

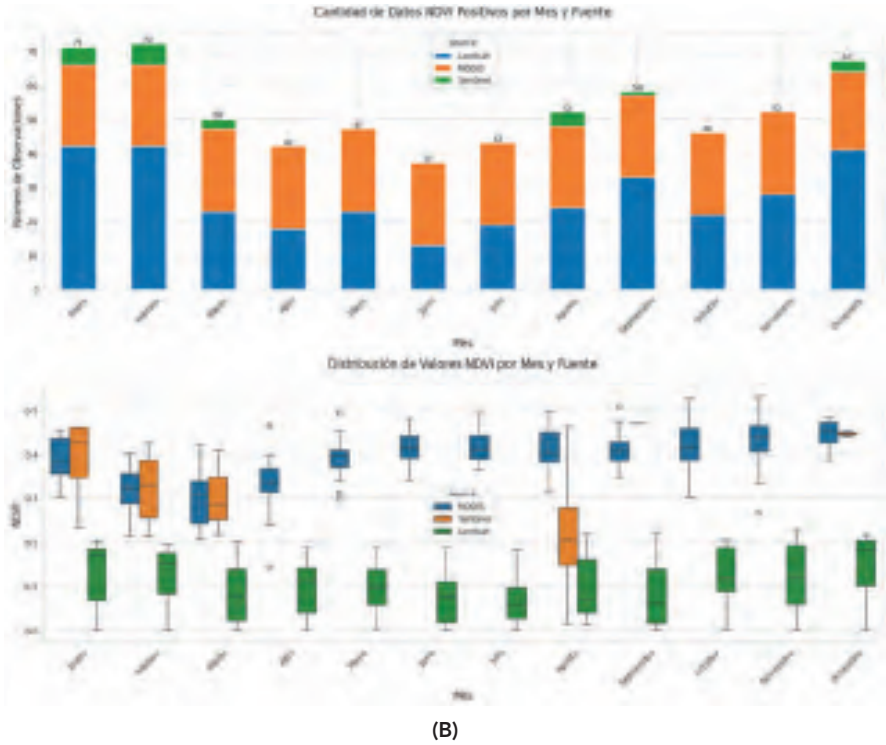


Figura 3. Datos limpiados de NDVI por meses desde los años 1984 hasta 2023
Çdel satélite LANDSAT 5, 7 y 8; SENTINEL 2A y MODIS (A) Embalse Chuza
(B) Laguna los Tunjos y los embalses Chisacá y La Regadera

Nota: elaboración propia.

La tercera fase fueron los algoritmos usados para determinar el comportamiento vegetativo del ecosistema terrestre; se han desarrollado varios índices que emplean diferentes bandas de longitud de onda obtenidas de imágenes satelitales. Para este estudio se destacan los índices de NDVI, que son dependientes de las condiciones de las áreas de estudio, permitiendo identificar la relación normalizada del rojo. Los métodos usados para identificar las propiedades de reflectancia espectral de la vegetación (Avtar et al., 2014b). Observar ecuación 1.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \tag{1}$$

Las bandas de reflectancia espectral: RED (rojo), GREEN (verde), BLUE (reflectancia azul), G (ganancia de 2.5), C1 y C2 (Coeficientes de aerosol en la corrección atmosférica), L (Valor de Ajuste al Suelo) y NIR (infrarrojo).

Después de obtener el *data set* de los datos vegetativos y meteorológicos como se observa en la Figura 4, el algoritmo para el procesamiento de los datos, permitiendo la comparación entre ellos, de acuerdo con el coeficiente de regresión lineal por cada dato adquirido.

Algoritmo I. Adquisición y procesamiento de imagen

Precondición:

- 1 **declarar** polígono de interés
- 2 **declarar** variables de nubosidad
- 3 **declarar** año
- 4 **declarar** bandas
- 5 **declarar** temperatura
- 6 **declara** precipitaciones
- 7 **crear** gráfico de índices
- 8 **crear** crea mapa
- 9 **función:** adquisición
 - 10 **clasifica** bandas por series temporales
 - 11 **crea** probabilidades
 - Imprime** bandas
- 12 **fin función**
- 13 **función:** procesamiento
 - 14 **descargar** datos
 - 15 **calcula** índices
 - 16 **clasificación** por tipo de indicies
 - 17 **crear** promedio de los índices
 - compara** índices por años
 - calcula** coeficiente de regresión lineal
 - 18 **crea** gráfico de comparación
 - imprime** mapa
- 19 **retornar**
- 20 **fin función**
- 21 **función** temperatura
 - descargar** datos
 - compara** temperaturas anuales
 - calcula** coeficiente de regresión lineal
 - imprime** gráfico
- 22 **retornar**
- 23 **fin función**
- 24 **función** precipitaciones
 - descargar** datos
 - compara** precipitaciones anuales
 - calcula** coeficiente de regresión lineal
 - imprime** gráfico

```

29 fin función
30 función estadística NDVI, EVI & SAVI
    Calcular regresión lineal
    Calcular desviación estándar
    Calcular error cuadrático medio y error absoluto medio
    Calcular Predicciones
    Imprimir gráfico
36 fin función
    
```

Figura 4. Seudocódigo de la adquisición y procesamiento de imagen

Nota: elaboración propia.

Por consiguiente, los datos de temperatura y precipitaciones adquiridos del satélite IDOH entre los años 2002 a 2023, promediando los 12 meses por cada año y comparándose entre sí, como se puede observar en la Figura 3. Datos de precipitaciones y temperatura de los años 2002 hasta 2023.

El análisis de los datos de precipitación y temperatura desde 2002 hasta 2023, que se visualizan en la Figura 5, son significativos en la región del embalse de Chuza. Durante los meses de enero a marzo y de octubre a diciembre, se observa una correlación positiva entre precipitación y temperatura, donde ambos valores son altos, indicando una temporada lluviosa con temperaturas cálidas. En contraste, de mayo a julio hay una correlación negativa, con mínimas precipitaciones y temperaturas más bajas, reflejando una estación seca y fresca. Los cambios en la precipitación parecen influir directamente en las temperaturas, destacando la importancia de considerar estos patrones para la gestión de recursos hídricos y la planificación agrícola. Este análisis subraya la necesidad de estrategias adaptativas para enfrentar variaciones estacionales extremas y garantizar la sostenibilidad del ecosistema en Chuza. Ver Figura 5A.

En el Sumapaz, la laguna los Tunjos y los embalses Chisacá y La Regadera, como se observa en la Figura 5B, en cuanto a las temperaturas, se observa que el mes más cálido es febrero con 15,37°C, seguido por abril con 15,18°C y marzo con 15,13°C, lo que indica que el final del verano presenta las temperaturas más elevadas. Por otro lado, las temperaturas más bajas se registran en julio con 14,12°C, seguido por noviembre con 14,03°C y junio con 14,28°C, mostrando que el período más frío se concentra en el invierno.

Respecto a las precipitaciones, se evidencia una marcada variación estacional. El mes más lluvioso es marzo, con un promedio de 15,95 mm, seguido por febrero con 12,31 mm y abril con 12,13 mm, lo que indica que el final del verano y comienzo del otoño concentra el período más húmedo. En contraste, los meses más secos son julio, con apenas 1,47 mm de precipitación, seguido por agosto con 1,95 mm y junio con 4,31 mm, coincidiendo con la temporada de invierno. Esta distribución muestra un patrón donde las precipitaciones más abundantes ocurren en los meses más cálidos y disminuyen significativamente durante los meses más fríos.

Es interesante notar que existe cierta correlación entre temperatura y precipitaciones, donde los meses más cálidos tienden a presentar mayores niveles de precipitación, mientras que los meses más fríos coinciden con el período más seco del año. Ver Figura 5B.

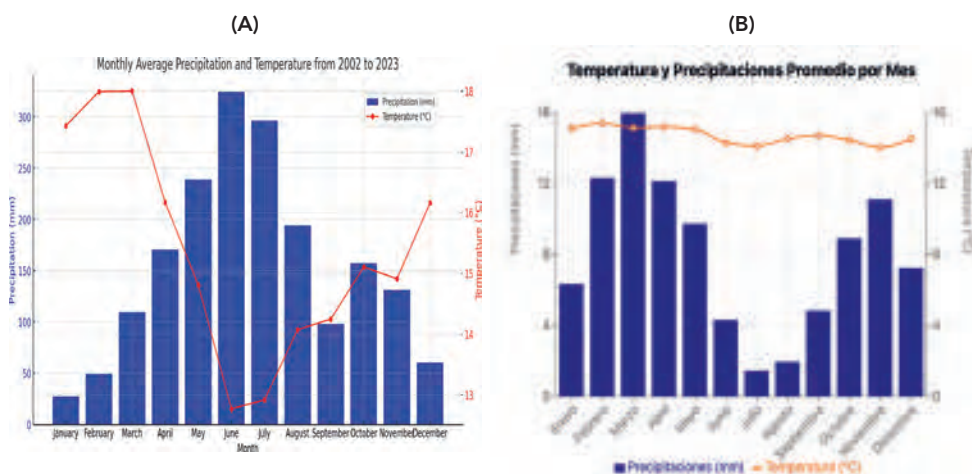


Figura 5. Gráfico secundario precipitaciones (mm) y temperatura de los territorios. (A) Embalse de Chuza. (B) Mapa del Índice de Vegetación NDVI de la laguna los Tunjos y los embalses Chisacá y La Regadera.

Nota: elaboración propia.

A continuación se pueden apreciar los mapas geográficos de los dos sistemas hídricos que abastecen la ciudad de Bogotá. Ver figura 6A.

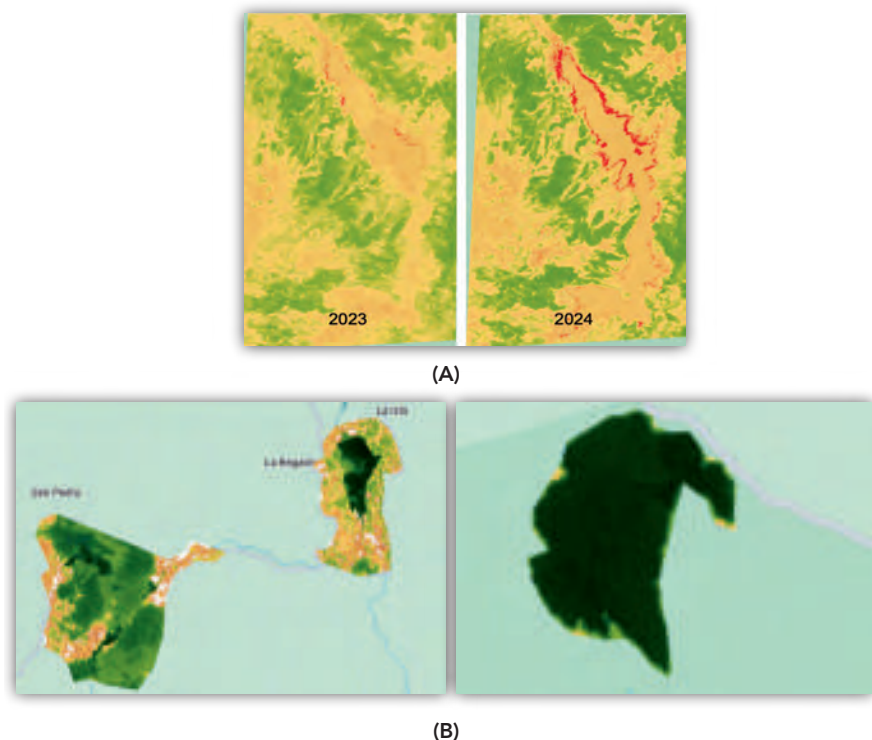


Figura 6. (A) Mapa del Índice de Vegetación NDVI del embalse de Chuza.
(B) Mapa del Índice de Vegetación NDVI de la laguna los Tunjos
y los embalses Chisacá y La Regadera

Nota: elaboración propia.

La Figura 7A muestra una tendencia ascendente en los valores NDVI desde 1985 hasta 2025, con una dispersión significativa de datos. En los primeros años (1985-1995), los valores NDVI se concentraban principalmente entre 0,0 y 0,4, mientras que a partir del año 2000 se observa una mayor variabilidad, con valores que alcanzan hasta 1,6. Esta evolución sugiere un aumento general en la cobertura vegetal o en su vigor a lo largo del tiempo.

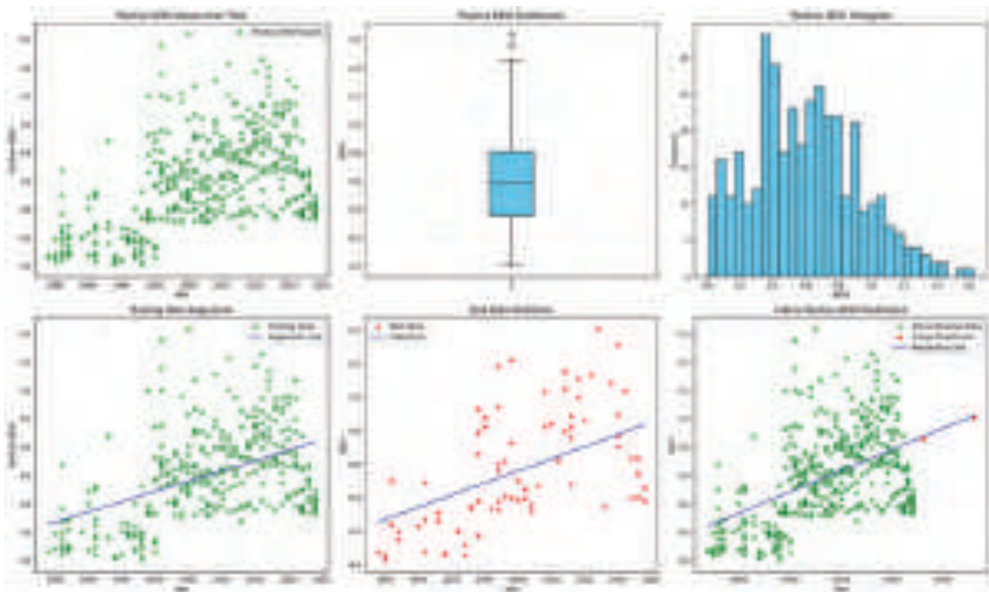
La distribución de puntos muestra una mayor densidad de datos en el período 2010-2025, con valores que oscilan principalmente entre 0,4 y 1,2. Se observan algunos valores atípicos superiores a 1,4, particularmente alrededor del año 2005, lo que podría indicar períodos de vegetación excepcionalmente densa o saludable.

El análisis estadístico del NDVI muestra una distribución centrada en 0,6, con valores típicos entre 0,4 y 0,8, característico de zonas con vegetación mixta, presentando algunos valores atípicos superiores a 1,4. El modelo de regresión evidencia una tendencia ascendente desde el período de entrenamiento hasta las predicciones futuras, proyectando valores cercanos a 1,0 para 2030. Sin embargo, la considerable dispersión de los datos alrededor de la línea de regresión sugiere una alta variabilidad tanto en los datos históricos como en las predicciones futuras. Estos resultados indican un incremento progresivo en la cobertura vegetal, aunque con un margen significativo de incertidumbre en las proyecciones a largo plazo.

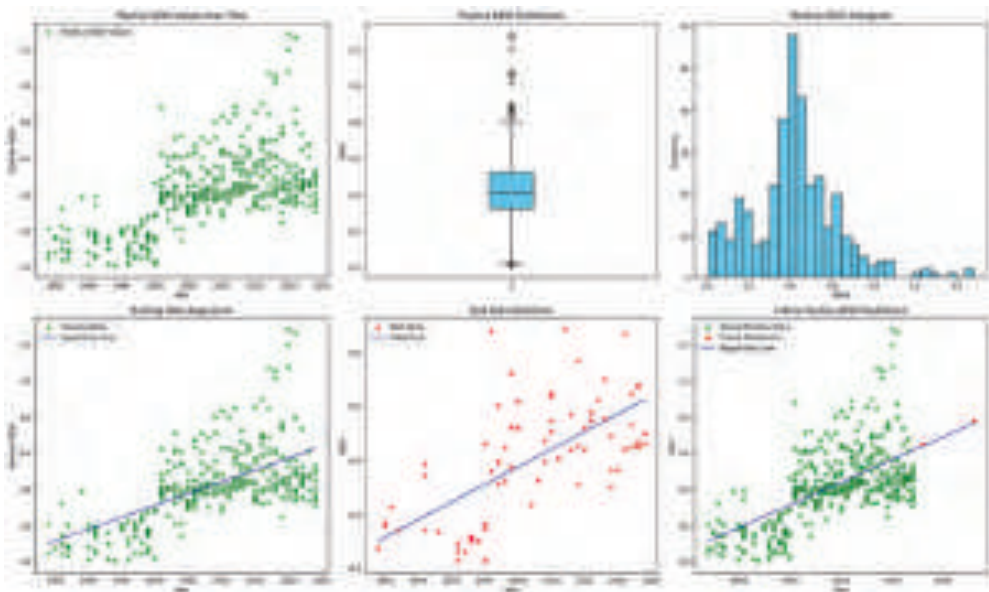
Para el sistema de abastecimiento de agua del Sumapaz se analizaron 637 imágenes satelitales con valores positivos del índice de vegetación NDVI desde 1984 hasta 2024, obteniendo un promedio de 0,419. Como se aprecia en la Figura 7B, los datos se dividieron en dos grupos: uno de entrenamiento con aproximadamente 510 imágenes (80%) y otro de prueba con cerca de 127 imágenes (20%). Ver Figura 7B.

El modelo predictivo alcanzó un coeficiente de determinación R^2 de 0,377, evidenciando que el 40 % de los datos se encuentra disperso fuera del rango principal de concentración. El diagrama de caja y bigotes (*box plot*) muestra una distribución asimétrica, donde la mayoría de valores atípicos se ubican por encima del tercer cuartil, mientras que el histograma revela una distribución bimodal con valores pico en 0,4 y 0,6.

Las predicciones realizadas sugieren que para el año 2026 el índice NDVI alcanzará un valor de 0,65, mientras que para el 2036 se estima que llegará a 0,75, lo cual indica un aumento progresivo en la cobertura vegetal de la zona estudiada.



(A)



(B)

Figura 7. Coeficiente de regresión lineal, media y dispersión de los datos.
(A) Embalse Chuza (B) La laguna los Tunjos y los embalses Chisacá y La Regadera

Nota: elaboración propia.

Conclusiones

1. El análisis multitemporal de imágenes satelitales (1984-2024) revela una tendencia ascendente en los valores NDVI para ambos sistemas de abastecimiento de agua de Bogotá, con el embalse de Chuza mostrando un incremento más pronunciado desde valores de 0,0-0,4 en 1985-1995 hasta 0,4-1,2 en 2010-2025. Esta evolución sugiere cambios significativos en la cobertura vegetal de las zonas estudiadas, lo cual podría tener implicaciones importantes para la gestión futura del recurso hídrico.
2. Los patrones de precipitación y temperatura muestran una correlación significativa en ambos sistemas, especialmente en el embalse de Chuza, donde se observa una correlación positiva durante los meses de enero a marzo y de octubre a diciembre (temporada lluviosa con temperaturas cálidas) y una correlación negativa de mayo a julio (estación seca y fresca). Esta variabilidad estacional destaca la necesidad de implementar estrategias adaptativas para la gestión sostenible del agua en la región.

Referencias

- Acueducto. (2023). Sistema Chingaza.
- Alcaldía Local de Sumapaz. (2024, marzo). *Páramo de Sumapaz, orgullo colombiano en el Día Mundial del Agua*. Recuperado de <https://www.sumapaz.gov.co/noticias/paramo-sumapaz-orgullo-colombiano-dia-mundial-del-agua>
- Avtar, R., Saito, O., Singh, G., Kobayashi, H., Ali, Y., Herath, S., & Takeuchi, K. (2014a). *Monitoring responses of terrestrial ecosystem to climate variations using multi temporal remote sensing data in Ghana. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946535>
- Avtar, R., Saito, O., Singh, G., Kobayashi, H., Ali, Y., Herath, S., & Takeuchi, K. (2014b). *Monitoring responses of terrestrial ecosystem to climate variations using multi temporal remote sensing data in Ghana. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946535>
- Avtar, R., Yunus, A. P., Saito, O., Kharrazi, A., Kumar, P., & Takeuchi, K. (2022a). *Multi-temporal remote sensing data to monitor terrestrial ecosystem responses to climate variations in Ghana. Geocarto International, 37(2)*. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1723716>

- Avtar, R., Yunus, A. P., Saito, O., Kharrazi, A., Kumar, P., & Takeuchi, K. (2022b). Multi-temporal remote sensing data to monitor terrestrial ecosystem responses to climate variations in Ghana. *Geocarto International*, 37(2). <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1723716>
- Banco Mundial. (2020, 2 de septiembre). *Colombia: rica en agua, pero con sed de inversiones*. Recuperado de <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2020/09/02/colombia-water-security>
- Canal Capital. (2023). *Conoce el sistema de abastecimiento Chingaza* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=2vH7Kb7YIVc>
- Caracol Radio. (2024). *¿Cómo van los embalses en Colombia? Niveles en aumento o disminución según la CAR*. Recuperado de <https://caracol.com.co/2024/10/06/como-van-los-embalses-en-colombia-niveles-en-aumento-o-disminucion-segun-la-car/>
- Caracol Televisión. (2022). *Así funciona el sistema de abastecimiento de agua en Chingaza* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=04XzITyBjQ4>
- Conservamos la Naturaleza. (2023). *El Páramo de Sumapaz, un tesoro natural de Colombia* [Video]. YouTube. <https://youtu.be/q7m1vAfEHTc>
- Cuéllar, Y., & Pérez, L. (2023). Multitemporal modeling and simulation of the complex dynamics in urban wetlands: the case of Bogotá, Colombia. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36600-8>
- Ghansah, B., Foster, T., Higginbottom, T. P., Adhikari, R., & Zwart, S. J. (2022). Monitoring spatial-temporal variations of surface areas of small reservoirs in Ghana's Upper East Region using Sentinel-2 satellite imagery and machine learning. In *Physics and Chemistry of the Earth* (Vol. 125). <https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.103082>
- Hellweger, F. L., Schlosser, P., Lall, U., & Weissel, J. K. (2004). Use of satellite imagery for water quality studies in New York Harbor. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61(3), 437–448. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.06.019>
- Isoaho, A., Ikkala, L., Pääkkilä, L., Marttila, H., Kareksela, S., & Räsänen, A. (2024). Multi-sensor satellite imagery reveals spatiotemporal changes in peatland water table after restoration. *Remote Sensing of Environment*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114144>
- Li, D., Wu, B., Chen, B., Qin, C., Wang, Y., Zhang, Y., & Xue, Y. (2020a). Open-surface river extraction based on sentinel-2 MSI imagery and DEM Data: Case study

- of the upper yellow river. *Remote Sensing*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/RS12172737>
- Li, D., Wu, B., Chen, B., Qin, C., Wang, Y., Zhang, Y., & Xue, Y. (2020b). Open-surface river extraction based on sentinel-2 MSI imagery and DEM Data: Case study of the upper yellow river. *Remote Sensing*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/RS12172737>
- Naciones Unidas. (2020). *El agua: en el centro de la crisis climática*. Recuperado de <https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/water>
- Organización Meteorológica Mundial. (2024, 7 de octubre). *Un informe de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) pone de relieve la creciente escasez y estrés que afecta a los recursos hídricos mundiales*. Recuperado de <https://public.wmo.int/es/news/media-centre/un-informe-de-la-organizacion-meteorologica-mundial-omm-pone-de-relieve-la-creciente-escasez-y>
- Sabogal, C. L., Pedroza, L. M., & González, G. (2023). Análisis de la vegetación a partir de índices espectrales y su relevancia en la identificación de espejos de agua en el humedal Torca Guaymaral, Bogotá, Colombia. *Avances Investigación En Ingeniería*, 20(2). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.10708>
- Sanjay, P., Das, D., & Damani, O. P. (2019). Well detection in satellite images using convolutional neural networks. *GISTAM 2019 - Proceedings of the 5th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*. <https://doi.org/10.5220/0007734901170125>
- Secretaría Distrital de Planeación. (2024). *ABC del Plan de Desarrollo Distrital*. Recuperado de https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/generales/abc_plan_desarrollo-distrital_qr_0.pdf
- Suárez, A., Jiménez, A., Castro, M., y Cruz, A. (2017). Clasificación y mapeo automático de coberturas del suelo en imágenes satelitales utilizando Redes Neuronales Convolucionales. *Orinoquia*, 21(1).
- UN-Water. (2020). *Water and Climate Change*. Recuperado de <https://www.unwater.org/water-facts/water-and-climate-change>
- Zhao, Y., He, X., Pan, S., Bai, Y., Wang, D., Li, T., Gong, F., & Zhang, X. (2024). Satellite retrievals of water quality for diverse inland waters from Sentinel-2 images: An example from Zhejiang Province, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 132, 104048. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104048>

Capítulo 6

MÉTRICAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HÍDRICA EN COLEGIOS PÚBLICOS K-12 DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA: EVALUACIÓN PARA TOMA DE DECISIONES FRENTE A LOS ODS

*Energy and Water Efficiency Metrics
in Public K-12 Schools in the City of
Barranquilla: Evaluation for Decision-
Making in Relation to the SDGs*

Liliana Medina Campos
Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca

Nelson Andrés Martínez Marín
Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca

Sergio Alfonso Ballén Zamora
Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca

Wilmer Montes Martínez
Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca

Resumen

Este capítulo presenta la evaluación de métricas de eficiencia energética, eficiencia hídrica y carbono operacional en colegios públicos de educación básica y media (K-12) de la ciudad de Barranquilla. El análisis se basa en la caracterización de los consumos de energía y agua en instituciones educativas oficiales, con el propósito de identificar patrones de uso, rangos de consumo y su relación con condiciones climáticas y territoriales. Los resultados permiten establecer líneas base de desempeño y aportan insumos técnicos para la toma de decisiones institucionales orientadas a la mejora del desempeño ambiental del sector educativo, en coherencia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con educación, agua, energía y acción climática.

Introducción

La sostenibilidad para el sector edificatorio viene mostrando un avance notorio en el país. Lo anterior se manifiesta en la evolución de la normatividad específica para el sector; las iniciativas de organizaciones gremiales; y el desarrollo de procesos de certificación en sostenibilidad en nuevos proyectos licenciados, los cuales observan categorías y criterios propios de esquemas de certificación en construcción sostenible. En el marco de dichas certificaciones, tienen especial participación proyectos de vivienda, así como edificaciones de uso institucional enmarcadas en algún sistema de certificación en los últimos 10 años (2013-2023). De acuerdo con el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) para el periodo mencionado, un 16 % del total de las edificaciones diseñadas y puestas en operación fueron certificadas bajo alguno de los sellos de sostenibilidad disponibles en Colombia (CCCS, 2024).

La evolución normativa mencionada, especialmente aquella que se refiere al desempeño de las edificaciones en sus consumos de energía y agua (Resolución 0549 de 2015), se encuentra para 2024 en un proceso de fortalecimiento y actualización, lo cual demuestra un cierto compromiso frente a los retos

que se presentan en el logro de reducciones significativas en estos consumos, tanto en edificaciones nuevas como existentes. Lo anterior es evidencia de que existe la necesidad de realizar una evaluación permanente de la eficiencia hídrica y energética en edificaciones, junto con la identificación de acciones y estrategias que redunden en desempeño más sostenible de las edificaciones en su etapa de operación y mantenimiento, en cumplimiento de las metas y objetivos nacionales planteados frente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS.

Durante la vigencia 2024, el grupo de investigación EcoEdificación, adscrito a la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, en el marco del proyecto de investigación “Neto cero carbono en edificaciones educativas existentes: caso de estudio Barranquilla y Bogotá”, ha realizado la caracterización de los consumos energéticos e hídricos en 168 colegios públicos de la ciudad de Barranquilla (para un total de 246 sedes). Lo anterior con el fin de realizar recomendaciones orientadas a la optimización del desempeño de estas edificaciones, y facilitar la toma de decisiones desde la Secretaría de Educación de esta ciudad (SED-Barranquilla), en relación con la integración de energías renovables en algunas de las edificaciones como parte de las iniciativas de la administración municipal en el cumplimiento de metas de los ODS:

- 4: Educación de Calidad con la meta 4.7 *De aquí a 2030, asegurar que todos los alumnos adquieran los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para promover el desarrollo sostenible, entre otras cosas, mediante la educación para el desarrollo sostenible y los estilos de vida sostenibles.*
- 6: Agua Limpia y Saneamiento, especialmente en la meta 6.4 *De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores*; 7: Energía Asequible y No Contaminante con la meta 7.3 *De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética y de forma integrada.*
- 13: Acción por el clima en la meta 13.3 *Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana*, con la métrica de carbono operacional a partir del consumo energético de estas edificaciones.

Visión nacional para el sector de educación - Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026

El Plan Nacional de Desarrollo PND 2022-2026 contempla como una de sus principales fortalezas el reconocimiento de los territorios y enfoques desde el ordenamiento territorial en función de las dinámicas hídricas del país, así como la transición a la descarbonización del país en su matriz energética (Departamento Nacional de Planeación, 2023).

Entre las principales temáticas del plan, en relación con la transformación del desarrollo del país, se destacan: acceso y apoyo a la educación (enfoque a la educación universitaria); cambio climático; energía limpia; desarrollo económico y medio ambiente; y oferta de servicios públicos en zonas rurales.

Si bien el PND 2022-2026 integra de manera central aspectos relacionados con la sostenibilidad, no tiene en cuenta de manera específica objetivos: metas, indicadores, planes o proyectos relacionados de manera directa con la sostenibilidad aplicable en las edificaciones correspondientes a la categoría de infraestructura educativa nueva o existente. Por otra parte, tampoco incluye la necesidad de observar aspectos curriculares en sostenibilidad para la educación básica y media en el país.

Sin embargo, llama la atención de la reciente sanción de la Ley 2427 del 9 de septiembre de 2024, “Por la cual se establece la capacitación, la profundización y la enseñanza para la sostenibilidad ambiental, cambio climático y gestión del riesgo de desastres y se dictan otras disposiciones”, oportunidad para que la evaluación del desempeño de las edificaciones de uso educativo sean utilizadas como herramientas de aprendizaje con integración de datos de consumo energético e hídrico como elementos con potencial inclusión en los procesos de enseñanza-aprendizaje.

Iniciativas de sostenibilidad para la infraestructura de uso educativo.

En Colombia, la adopción de aspectos relacionados con la sostenibilidad en las edificaciones, y especialmente con la eficiencia hídrica, energética y el concepto de carbono operacional en las edificaciones, se ha ido fortaleciendo desde la primera década del siglo XXI, mediante esfuerzos liderados

por el Consejo Nacional de Política Económica y Social CONPES, a través de la emisión de documentos de políticas aplicables en la materia; el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, mediante la realización de estudios y documentos técnicos; el ICONTEC, mediante la actualización de Normas Técnicas Colombianas para la infraestructura educativa; y el Ministerio de Ambiente con la promulgación de la Resolución 0549 de 2015. Dichos documentos establecen el marco normativo y/o de referencia nacional en materia de sostenibilidad en edificaciones de manera general y de edificaciones para uso educativo de manera particular.

A continuación, la Tabla 1 presenta un resumen de los principales referentes relacionados con la sostenibilidad para la infraestructura de uso educativo en Colombia.

Tabla 1. Referentes Nacionales como lineamientos de sostenibilidad para la infraestructura de uso educativo

Entidad	Documento de Referencia	Año de publicación (o actualización)	Principal Enfoque
Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	Resolución 0549	2015	Parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adopta la guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones.
Ministerio de Educación Nacional - ICONTEC	Norma Técnica Colombiana NTC 4595 y Norma Técnica Colombiana NTC 4596	2006	Genera lineamientos para el diseño y la implementación de ambientes escolares considerando las actualizaciones de normas conexas como la NSR10-Sismorresistencia, normatividad de accesibilidad e integra aspectos del acondicionamiento acústico y señalización en las instituciones de uso educativo
Ministerio de Educación Nacional	Colegio 10, Lineamientos y recomendaciones para el diseño arquitectónico del colegio de jornada única	2015	Propone una infraestructura de calidad para la implementación de la jornada única, con soluciones eficientes y nuevas tecnologías para contribuir y garantizar el desarrollo pedagógico y de aprendizaje. Contempla, desde las especificaciones de diseño la aplicación de arquitectura bioclimática para la reducción de consumos energéticos relacionados con sistemas activos (mecánicos) para el logro del confort térmico al interior de las áreas de aprendizaje. Además, se incluye el concepto de Uso Racional y Eficiente de la Energía, incluyendo estrategias como la integración de sistemas de generación fotovoltaica.

Entidad	Documento de Referencia	Año de publicación (o actualización)	Principal Enfoque
Consejo Colombiano de Construcción Sostenible CCCS	Guía para la implementación de estrategias de sostenibilidad en diseño y construcción de colegios nuevos de jornada única en Colombia	2017	Con enfoque a edificaciones nuevas, articula información que, como recomendaciones, pueden establecer una metodología para el desempeño en relación con la energía, cotejando con los valores establecidos por la Resolución 549 de 2015 para la línea base de consumo, según clima y tipo de edificación.
Consejo Nacional de Política Económica y Social	CONPES 3919 Política Nacional de Edificaciones Sostenibles	2018	Impulsar la inclusión de criterios de sostenibilidad dentro del ciclo de vida de las edificaciones, a través de instrumentos para la transición, seguimiento y control, e incentivos financieros que permitan implementar iniciativas de construcción sostenible con un horizonte de acción hasta el 2025
Consejo Colombiano de Construcción Sostenible CCCS	Guía de Comisionamiento para Ventilación Natural	2020	Este documento, si bien contempla los aspectos a ser verificados en construcciones nuevas, aspectos como los parámetros relacionados con el confort y las renovaciones que pueden incidir en que se utilicen soluciones mecánicas o activas (ej. ventiladores de techo), incrementando el consumo energético y por ende el carbono operativo.
Consejo Colombiano de Construcción Sostenible CCCS	Hoja de Ruta de Sostenibilidad para Materiales de Construcción	2021	Contempla aspectos de sostenibilidad, entre los que impactan el factor de confort térmico y que, para renovaciones en edificaciones existentes, pueden ser integrados para especificaciones que redunden en menor necesidad de uso de soluciones mecánicas o activas (ej. ventiladores de techo), incrementando el consumo energético y por ende el carbono operativo.
Consejo Colombiano de Construcción Sostenible CCCS	Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono	2022	Documento que identifica las brechas y oportunidades de acción para todo el sector edificatorio en relación con las edificaciones nuevas, para las edificaciones existentes, identifica la necesidad de que las renovaciones (intervenciones mayores), se implementen con medidas hacia la descarbonización, resaltando la necesidad de generación de instrumentos normativos, así como incentivos para las edificaciones existentes.

Nota: elaboración de los autores con fundamento en los documentos citados.

Se observa, de acuerdo con lo anterior, que desde el año 2015 viene en aumento el desarrollo de políticas y documentos técnicos relacionados con

la sostenibilidad en edificaciones de uso educativo con énfasis en aspectos tales como el confort térmico, lumínico y acústico; el diseño inclusivo; la eficiencia hídrica y energética; y la carbono neutralidad con un enfoque en el ciclo de vida de la edificación.

A continuación, la figura 1 presenta el total de metros cuadrados licenciados por tipo de edificación que consideran un esquema de certificación. Dicha figura ilustra que el sector de educación no alcanza en promedio el medio millón de metros cuadrados licenciados anualmente, esto en consideración a que la evolución en metros cuadrados (m^2) licenciados para edificaciones de uso educativo fue de 904.227 m^2 en 2019, 419.756 m^2 en 2020 y que entre el año 2002-2021 (primer semestre) totalizó a 4.773.311 m^2 (FFIE, 2022). Para el primer semestre de 2024, de acuerdo con FFIE, se realizó la entrega de 213 colegios mejorados; y de 25 nuevos o ampliados. El monto invertido en los proyectos mencionados ascendió a COP\$334.343 millones, de los cuales el caribe colombiano se vio beneficiado con una inversión de apenas el 6%, es decir, COP\$20.038 millones (FFIE, 2024).

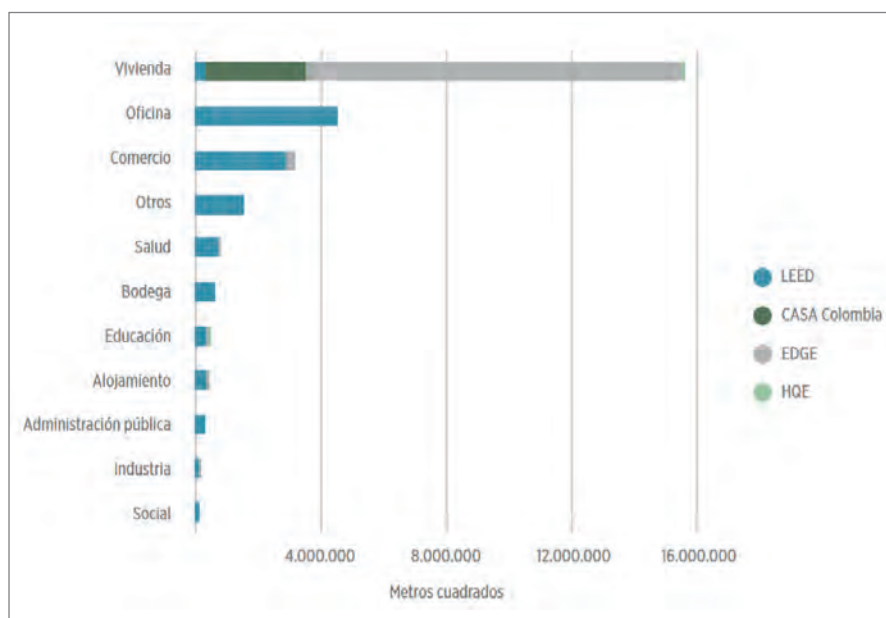


Figura 1. Área de proyectos registrados por tipología en los sistemas de certificación en Colombia

Nota: figura elaborada a partir de cifras de cada administrador, CCCS, USGBC, Camacol, CERWAY. Cifras a diciembre de 2023. Tomado de CCCS (2024).

Además de lo anterior, se destaca que el Ministerio de Educación Nacional (MEN), inició durante el mes de octubre de 2023 un proceso de diagnóstico de plantas físicas educativas con el fin de establecer necesidades de inversión y mejoramiento, que, entre otros temas, contempla la instalación de soluciones para la autogeneración eléctrica como elemento requerido para alcanzar la carbono-neutralidad.

Aunque el enfoque del evento citado arriba se inclinó a las necesidades de construcción de infraestructura, se espera que, desde el MEN y las instancias respectivas, las edificaciones educativas existentes en el país puedan ser evaluadas frente a las metas mínimas de ahorro en consumo de agua y energía (energía operacional), con el fin de proponer rutas específicas en cada caso analizado que facilite el logro establecido de una disminución del 30% del carbono operacional para 2030.

En relación con las generalidades presentadas, se presenta en el siguiente apartado la evaluación de los consumos energéticos y de agua de los colegios públicos de Barranquilla para el año 2023, así como la estimación de emisiones de carbono asociado al consumo energético con base en los factores de emisión contemplados en la Resolución 000705 de 2024 emitida por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME, 2024).

Evaluación de la eficiencia energética e hídrica en colegios públicos de Barranquilla

Consumo Energético y Métrica de Carbono Asociado en 128 colegios de la ciudad de Barranquilla

El análisis del consumo energético con base en la información suministrada por la Secretaría de Educación Distrital SED-Barranquilla, se realizó mediante la observación de información disponible para cuatro zonas o agrupaciones, identificadas a partir de su ubicación geográfica en la ciudad con criterios como Z1: cercanía al Río Magdalena; Z2: cercanía al río y al mar; Z3: mayor presencia de vegetación; Z4: predominancia de superficies duras, como se puede observar en la figura 2. Además de ello se tuvo en cuenta el nivel de consumo energético de las infraestructuras en un total de cinco rangos de consumo, identificados en orden alfabético entre la A y la F, los cuales se encuentran entre consumos inferiores a un kilowatt hora

al mes (KWh/mes) por estudiante en su límite inferior y más de 30 KWh/mes por estudiante en su límite superior, de acuerdo con información aportada en la figura 3. Los resultados de las observaciones permitieron identificar que la mayor cantidad de colegios se encuentran clasificados C y D con consumos entre los 5 y los 20 KW/h/mes por estudiante; de igual forma, que los colegios con la clasificación de mayor consumo (>30 KWh/mes) se encuentran ubicados en las zonas 2 y 3.

Se encontró una tendencia de incremento en consumo de electricidad en los meses junio – octubre, en coincidencia con los meses de mayor temperatura promedio registrados (abril – septiembre), en un rango entre los 32,9°C y los 33,4°C, datos multianuales de 1981 a 2010 reportados en el atlas climatológico colombiano (IDEAM, 2017). De acuerdo con ello, el aumento en el consumo energético puede ser atribuido *al consumo asociado a la operación de equipos de aire acondicionado instalados en las edificaciones educativas*.

Por otra parte, el análisis de la información permitió establecer que los consumos promedio varían entre 94 KWh/m (0,204 KWh/m por estudiante), de acuerdo con lo analizado para el Colegio Distrital José Eusebio Caro Sede 2, reportando 459 estudiantes, métrica que se encuentra muy por debajo del consumo energético de subsistencia para zonas debajo de los 1000 metros sobre el nivel del mar estimado por la UPME en 173 KWh/m (Santamaría, 2023) y 14.699 KWh/m (61,5 KWh/m por estudiante), reportado por la I.E.D. Salvador Suárez, sede 3, con un total 239 estudiantes, consumo muy por encima de la métrica mencionada. Para el momento de redacción del presente texto se encuentra pendiente la visita de campo que permita establecer la cantidad y tipo de equipos dotados en las distintas infraestructuras, con el fin de identificar de manera concreta si los bajos consumos presentados en el primer caso mencionado se deben a deficiencias dotacionales, o quizás a medidas de eficiencia energética adoptadas por el Colegio Distrital José Eusebio Caro.

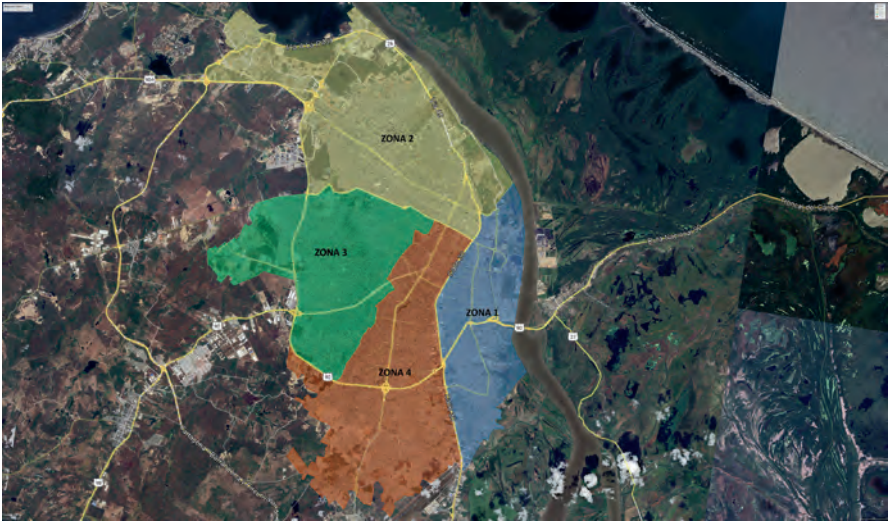


Figura 2. Zonificación de distribución de infraestructura educativa existente en Barranquilla

Nota: elaboración de los autores.

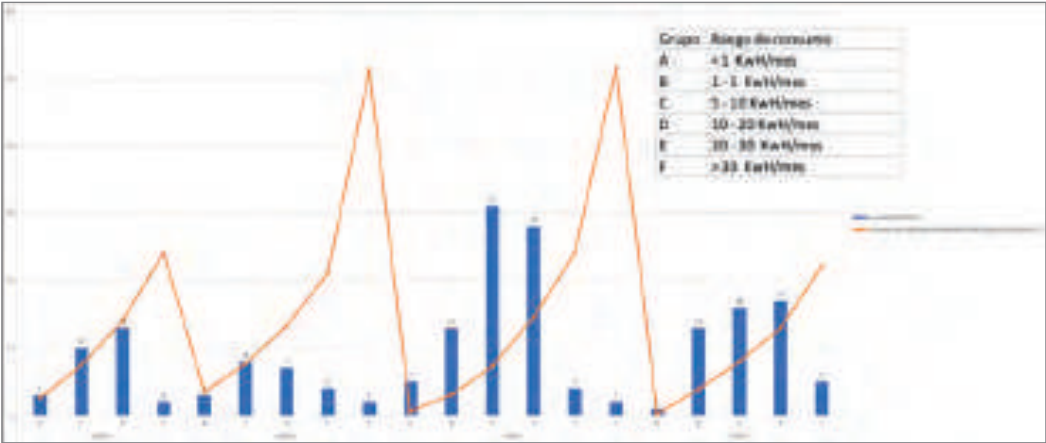


Figura 3. Distribución de consumos energéticos por rangos y zonas

Nota: elaboración de los autores.

En relación con lo anterior, se analizaron los datos de consumo promedio por estudiante, se promediaron según la zona en que se encuentran, dejando ver que los mayores consumos promedio por estudiante se encuentran en la zona 2, seguida de la zona 3, como se observa en la figura 4.

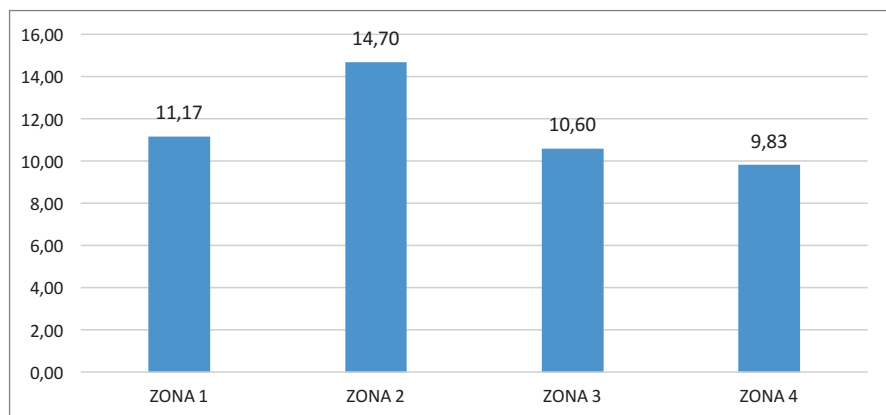


Figura 4. Consumo promedio por estudiante por zona

Nota: elaboración de los autores.

En relación con las emisiones de gases de efecto invernadero y expresadas en toneladas de CO_2 equivalente (CO_2eq), asociadas al consumo de energía en la operación de las infraestructuras educativas del Distrito de Barranquilla, y cuyo resumen se presenta en la Imagen 4, se encuentra que la gran mayoría de las edificaciones cuentan con emisiones en un rango entre 0,01 – 3.68 TnCO_2eq y el dato por estudiante oscila entre 0,00002 - 0,00688 TnCO_2eq . Los resultados al momento no permiten una comparación a nivel nacional, ya que no se tiene una evaluación similar del total de la infraestructura educativa realizada en el país, pero se destaca que la evaluación de las emisiones en los Estados Unidos para la infraestructura dedicada a la educación básica y secundaria (K12) fue de 41.951.864 toneladas métricas consumo que aumentará de acuerdo con las previsiones disponibles hasta las 66MMTn CO_2eq para 2030, lo cual ha llevado a identificar la necesidad de realizar adecuaciones que reduzcan los consumos asociados a sistemas de aire acondicionado HVAC, iluminación, equipos en general y transporte público dispuesto para los estudiantes (New Buildings Institute, 2021). Contrasta en lo mencionado el consumo energético de escuelas secundarias en los Estados Unidos, con los moderados consumos en la infraestructura educativa colombiana, asunto que responde a los altos consumos energéticos relacionados con la dotación institucional en cada caso.

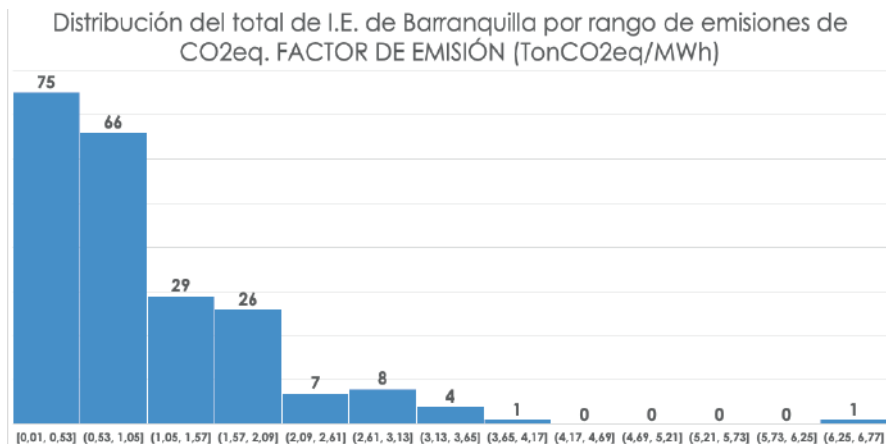


Figura 5. Distribución de rangos de emisiones y total de colegios por rango para la ciudad de Barranquilla en 2023

Nota: elaboración de los autores.

Métricas del Consumo de Agua

El recurso hídrico en Colombia es descrito por el Instituto de Hidrología y Medio Ambiente, IDEAM, como “abundante”, comparado con la disponibilidad del agua a nivel global, con un volumen de escorrentía de 1.963Km³/año y un rendimiento promedio de 56,2 l/s/Km², quintuplicando el promedio mundial (Instituto de Hidrología, 2023). Sin embargo, es vulnerable a la intensificación de los periodos secos exacerbados por el fenómeno del Niño, afectando el suministro de agua que se surte de diferentes cuerpos de agua.

El consumo identificado para los colegios de Barranquilla mostró una distribución de agrupamiento del mayor número de colegios en el rango entre 0-3 l/per/día, métrica que es considerada como de ahorro, incluso en infraestructuras educativas ubicadas en ciudades de clima frío como Bogotá (Secretaría de Ambiente Distrital, 2015), la cual se representa en la figura 5, y que se encuentra en cumplimiento de los ahorros de agua esperados, de acuerdo con la resolución 0549/2015, muy por debajo del ahorro esperado para este tipo de edificaciones en clima cálido húmedo de reducción, el cual se establece en un 40%, teniendo en cuenta una línea base de consumo estimada en 24,8 L/per/día.

Como ocurre con el consumo energético, en el momento de redacción del presente texto se encuentra pendiente visita de campo que permita verificar los equipos, recursos y artefactos de consumo hídrico que permiten un bajo consumo, incluso frente a condiciones climáticas exigentes relacionadas con la presencia de altas temperaturas y alta humedad.

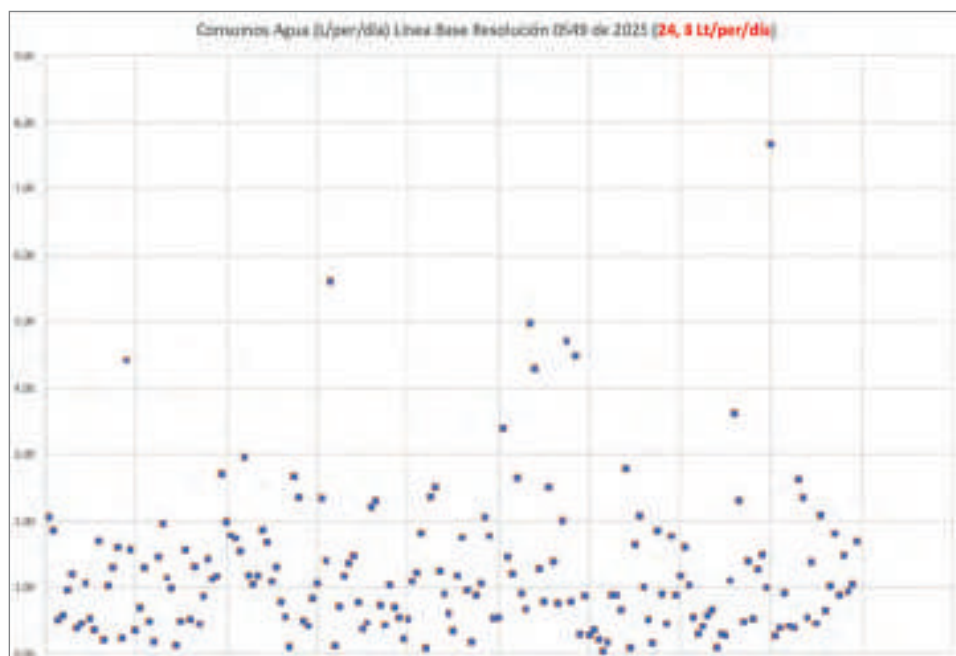


Figura 6. Distribución de colegios de la ciudad de Barranquilla en relación con el consumo de agua/persona en 2023

Nota: elaboración de los autores.

Conclusiones

La medición de la métrica de carbono operacional desde la eficiencia energética puede facilitar toma de decisión en términos de metas de descarbonización para el sector educativo. Al respecto, algunas de las infraestructuras educativas de la ciudad de Barranquilla muestran un consumo energético muy inferior a lo que se considera consumo de subsistencia de acuerdo con las autoridades en la materia. Será interesante conocer los motivos, incluido análisis del tiempo de ocupación de las infraestructuras, en relación con su

contribución al consumo individual total de los estudiantes de las instituciones a las que corresponde una muestra de estas edificaciones.

Para aquellos casos en los que el consumo energético se encuentra en el rango superior, los mismos se encuentran también dentro del consumo de subsistencia, aspecto que se considera positivo. Sin embargo, y atendiendo a la media de consumo energético en infraestructuras educativas en la ciudad de Barranquilla, será interesante conocer si es posible lograr aún mayores eficiencias.

El reconocimiento y monitoreo del uso responsable del recurso hídrico facilita en las edificaciones de uso educativo aspectos de administración de este. Llama la atención el bajo consumo de recurso hídrico en una ciudad que presenta altas temperaturas y una humedad relativa igualmente alta.

La métrica de carbono operacional, desde el establecimiento de línea base (medición de este proyecto), aporta al conocimiento desde la necesidad de implementación de estrategias de mitigación como la generación *in situ*, contemplando una integración de otras medidas de eficiencia energética.

El sector de educación en su proyección de estrategias de sostenibilidad y adaptación en edificaciones existentes puede ser articulada al fortalecimiento curricular, avanzando en el cumplimiento del requerimiento de la Ley 2427 del 9 de septiembre de 2024, "Por la cual se establece la capacitación, la profundización y la enseñanza para la sostenibilidad ambiental, cambio climático y gestión del riesgo de desastres y se dictan otras disposiciones."

Referencias

- CCCS. (2024). *Estado de la Construcción Sostenible en Colombia 2a Edición*. Bogotá D. C. doi:ISSN 3028-3922
- Departamento Nacional de Planeación, DNP. (2023). *Plan Nacional de Desarrollo*. Recuperado de Departamento Nacional de Planeación: <https://www.dnp.gov.co/plan-nacional-desarrollo/pnd-2022-2026>
- FFIE (2024). Fondo de Financiamiento de la Infraestructura Educativa. Recuperado de Fondo de Financiamiento de la Infraestructura Educativa: <https://ffie>.

com.co/bolivar-sucre-antioquia-vichada-y-valle-del-cauca-fueron-los-departamentos-en-donde-mas-obras-de-infraestructura-educativa-ha-entregado-el-ffie-en-2024/

FFIE, F. d. (2022). *Fondo de Financiamiento de Infraestructura Educativa - FFIE*.

IDEAM. (2017). Atlas Climatológico Colombiano. Bogotá D.C. doi: ISSN: 978 958 8067 95 7

Institute, N. -N. (April de 2021). New Buildings Institute. Recuperado el Septiembre de 2024, New Buildings Institute: https://newbuildings.org/wpcontent/uploads/2021/04/Schools_WhitePaper_202104.pdf

UPME. (2024). UPME. Recuperado de UPME: https://www1.upme.gov.co/Normatividad/705_2024.pdf

Capítulo 7

HACIA UN FUTURO SOSTENIBLE: ANÁLISIS DE LAS INICIATIVAS AMBIENTALES EN LA REDUCCIÓN DE EMISIONES, SONORA-MÉXICO

*Towards a Sustainable Future: Analysis
of Environmental Initiatives in Emissions
Reduction, Sonora, Mexico*

Ramón Gabriel Aguilar Vega
Politécnico Grancolombiano

Jessica Adhelaída Arredondo Martínez
Universidad Sonora de México

Alfredo Bustamante Avendaño
Universidad Sonora de México

Resumen

En el presente trabajo se desarrollarán e ilustrarán algunas de las acciones y medidas que se han realizado en el estado de Sonora (México), como un intento de controlar y disminuir los impactos que las altas temperaturas que caracterizan a este estado árido y desértico, suelen ocasionar en los municipios que lo conforman. El trabajo se enmarca en el ODS 7, energías limpias para la seguridad y accesibles para todos, dichas acciones van desde el desarrollo e instalación de tecnologías relacionadas con ciertas energías sostenibles solar y fotovoltaica, hasta la aprobación de leyes y políticas que garanticen la existencia de espacios verdes dentro de la urbanización para un mayor control de las altas temperaturas y la adaptación al cambio climático, especialmente de las empresas que han gastado miles de dólares en la transición de energías sostenibles. La descripción de los proyectos de sostenibilidad y ambiente identificados en Sonora, así como algunas proyecciones prospectivas en el impacto ambiental y social de los proyectos, donde la efectividad de las estrategias implementadas dependerá de las negociaciones con la comunidad y las organizaciones. Las áreas de éxito y desafíos enfrentados por los proyectos de sostenibilidad en Sonora y la extracción y ocupación de zonas ambientales que antes pertenecían a los territorios protegidos o comunidades indígenas.

Palabras clave: sostenibilidad, energía, ambiente, ecosistemas, desérticos.

Introducción

La seguridad energética es un pilar fundamental para las empresas y las organizaciones, necesaria para transformar, mover, producir, calentar, iluminar y casi cualquier otra actividad humana. Los hogares, así como las actividades comerciales e industriales, dependen de un suministro energético ininterrumpido para su correcto funcionamiento (CEDES, Oficina de Cambio Climático y Promoción Ambiental, 2018). En este sentido, el crecimiento económico y el desarrollo social están intrínsecamente relacionados con la evolución de la tecnología en la generación de energía y sus diversas aplicaciones. El sector energético que requiere México debe cumplir tres características esenciales: primero, debe ser confiable, lo que significa que el acceso a la energía debe ser constante; segundo, debe ofrecer precios accesibles, manteniendo el costo lo más bajo posible; y, tercero, debe ser seguro tanto en su uso como en su producción, generando el menor impacto negativo en la salud, tanto a nivel local como global (Daniel et al., 2014).

El cambio climático representa un riesgo existencial para la humanidad y las sociedades deben transformar las fuentes de su producción energética. Este cambio se encuentra en el corazón de México, el estado

de Sonora, con el concepto de transición energética, que implica el paso de economías dependientes de combustibles fósiles a economías con bajas emisiones de carbono o netas a cero, con el objetivo de que, en el futuro, toda la energía consumida provenga de fuentes renovables. Es prioritario favorecer la energía con la menor huella ambiental y las mínimas emisiones de carbono posibles. El sistema energético que México necesita debe poseer tres atributos fundamentales: ser confiable, competitivo y renovable (Ruiz et al., 2023). Estos son los cimientos sobre los cuales se puede edificar el potencial de crecimiento y desarrollo del país en la seguridad energética para el 2050.

El estado de Sonora es uno de los más extensos de México, con una superficie aproximada de 179.355 km², se localiza en el noroeste del país. Limita al norte con Arizona y Nuevo México en Estados Unidos, y su capital y ciudad más poblada es Hermosillo (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2013). La diversidad geográfica de Sonora se puede apreciar en las que predominan los desiertos semiáridos y las praderas, con un clima seco, semiseco y muy seco, especialmente en el golfo de California. Tiene una de las áreas más extensas de costa, con 816 kilómetros en el golfo de California. Sonora cuenta con playas de arena fina y blanca en una región de aguas poco profundas y tranquilas. En sus ecosistemas de desiertos son de mayor extensión, que están muy amenazados por la acción humana, especialmente por la deforestación y contaminación de los ríos; en estas áreas se pueden encontrar cactus, matorrales y áreas arenosas, destacando el desierto de Altar que alberga el campo volcánico. El ecosistema estratégico de El Pinacate, considerado el desierto más rico en biodiversidad de América, con especies endémicas únicas de la región desértica como el pupo del desierto (*Cyprinodon macularis*), en peligro de extinción.

Sonora se ubica en el noroeste de la entidad, y es aquí donde se localizarán fuentes inagotables de energía no contaminante como zonas para la producción de desechos orgánicos, madera y la coincidencia de condiciones específicas, durante el día y todo el año, ideales para instalar granjas solares para la generación de energía eléctrica. También enfrenta desafíos ambientales, siendo una de las regiones con tasas de desertificación más altas del mundo, por la escasez de agua superficial y atmosférica. La degradación de la tierra en áreas áridas y semiáridas ha llevado a la pérdida de productividad biológica y económica, y ser una de las regiones con más importaciones de recursos (Silveira-Gramont et al., 2018). En este trabajo

se exponen las principales iniciativas ambientales para reducir la huella de carbono y al largo plazo ser una región más sostenible. Para lograr ambos objetivos climáticos y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente el 7 y 13, acción por el clima, México debe avanzar hacia enfoques para lograr el Plan Sonora de Energías alternativas y limpias (García-Guerrero, 2024).

Los principales objetivos de este estudio son múltiples. Primero, identificar y analizar iniciativas ambientales existentes en la región de Sonora, enfocándose en su impacto en la reducción de emisiones, como proyectos de energía solar, fotovoltaica, biomasa e hidrógeno verde. También se maneja una metodología descriptiva cualitativa con una revisión literaria relevante frente a los artículos y revistas sobre el tema de la sostenibilidad y la transición energética del estado de sonora en bases principales como lens.org.

Contexto energético y ambiental del Estado de Sonora

En México existen una gran cantidad de regiones con gran potencial para el desarrollo de proyectos de energía renovable. Gracias a esto, los ODS plantean para el país el desafío de producir 43,2 gigavatios, lo que se debe alcanzar mucho antes del año 2050. Además, para ayudar al avance en el desarrollo de estos proyectos, se tiene como una de las metas de la Agenda 2030 incrementar la participación de energía limpia sobre el consumo total; ante la búsqueda masiva de emprendedores, empresas e inversionistas, el Gobierno planea captar 100 mil millones de pesos en inversión. Gracias a esto, sobre el ODS 9 se está incentivando de nuevo a difundir la cooperación en el desarrollo de proyectos de energía sostenible. En concordancia con el ODS. En la Agenda 2030, cada vez más proviene la inversión del sector privado, la cooperación descentralizada, la inversión extranjera directa y la inversión extranjera neta. Por esa razón, la generación de modelos eficientes de cooperación juega un papel importante para el desarrollo y la cooperación sostenible.

Es fundamental aumentar la participación de la electricidad en el consumo energético del país. La generación de energía eléctrica debe enfocarse cada vez más en fuentes renovables y limpias para enfrentar el cambio climático, cumplir con los objetivos de mitigación, y garantizar una energía

confiable y asequible para los consumidores (Gil & Enríquez, 2022). En este sentido, México debe utilizar sus recursos públicos de manera más eficiente, permitiendo que la inversión en actividades abiertas a la competencia, como la generación de energía, sea realizada por otros actores. Para fomentar esta inversión, debería ofrecer garantías legales y condiciones regulatorias predecibles que impulsen una mayor inversión a lo largo de toda la cadena de valor, especialmente en el ámbito de las energías renovables. Es esencial que el país se comprometa con el respeto al Estado de Sonora de derecho, para que México pueda alcanzar nuevamente las tasas de integración de energías renovables, y así en 2035 lograr la transición energética. Los mexicanos se verían directamente beneficiados con una matriz de generación más económica, lo que permitiría reducir la necesidad de recursos destinados a mantener las tarifas residenciales en niveles actuales e incluso a disminuirlas (Espinoza et al., 2020).

La mejora del hidrógeno verde en Sonora

Uno de los facilitadores del H₂ (hidrógeno verde) es mediante electrólisis a partir de fuentes de energía renovable. La implementación de energías renovables variables, como la eólica, presenta tanto un desafío para la producción masiva de hidrógeno dada la disponibilidad limitada y discontinua de las horas de operación de los electrolizadores como una oportunidad para utilizar el hidrógeno como un medio de almacenamiento de energía de estas fuentes intermitentes.

La demanda anual de agua requerida para la electrólisis en esta producción total representaría únicamente el 0,13% del consumo de agua del país. Se requerirían recursos públicos adicionales que pudieran ser dirigidos a áreas donde el gasto gubernamental no solo es crucial, sino que representa la única fuente de inversión o financiamiento. No se debe pasar por alto los beneficios ambientales que derivan de una reducción de la huella de carbón en la generación de energía (SENER, Secretaría de Energía, 2023).

Los recursos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) invertidos en la generación y en subsidios a las tarifas residenciales (que representan el 97% del uso residencial) implican un costo de oportunidad considerable, limitando así la disponibilidad de fondos para invertir en áreas prioritarias como la seguridad, la salud, la educación, la infraestructura de transmisión de la CFE y sus filiales de distribución. Por otro lado, la infraestructura de

transmisión debe expandirse a un ritmo coherente con el crecimiento de la demanda de energía eléctrica y la evolución de los costos de las tecnologías de generación. Esto implica la necesidad de gestionar una mayor proporción de generación a partir de fuentes renovables, por lo que una red robusta, confiable y moderna se convierte en un requisito absolutamente indispensable para el desarrollo del sector energético.

Matriz energética de México

Las estrategias en la matriz energética de México se contemplan con múltiples niveles de conversión contempladas en la producción de electricidad se efectúan hacia la energía mecánica a través del vapor de agua en turbinas o de la fermentación biológica de aceites y etanol, por la fusión de los equipos que contienen sulfuro de calcio, vaporización y atomización, además del reaprovechamiento de eliminación de desechos orgánicos que haya bajo las plantas de biomasa. La radiación solar que incide en toda la superficie terrestre, con excepción de las regiones polares, donde el sol nunca se encuentra en el cenit, es muy interesante y caracterizada, porque aquí está disponible y directa una cantidad significativa de energía, por lo que se mide en promedio la cantidad de energía que cae de manera perpendicular por medio de una superficie horizontal; a esto se le llama insolación. La región de México central y norte se distingue porque tiene una alta insolación, con un promedio diario de esa radiación solar que oscila entre 4.5 y 7 kilowatt-hora por metro cuadrado al día, dependiendo de la región.

La matriz energética de México debe alinearse con la eficiencia de costos que ofrecen las tecnologías de energía de bajo carbono. Gracias a su clima y diversidad geográfica, el país cuenta con la oportunidad de incrementar la integración de energías renovables en su capacidad eléctrica, aprovechando así sus ventajas comparativas. Para consolidar América del Norte como la región más competitiva en términos energéticos y con menores emisiones de gases de efecto invernadero, es fundamental que México aproveche al máximo su geografía y sus compromisos comerciales internacionales (Centro Nacional de Control de Energía, CENACE, 2015).

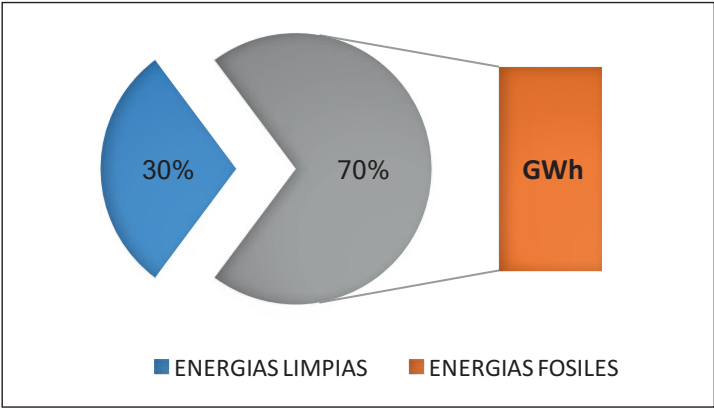


Figura 1. Matriz energética eléctrica de México

Nota: adaptada con datos del Centro Nacional de Control de Energía, CENACE.

En la figura 1 se observa el porcentaje de la matriz energética dependiente de las fuentes fósiles para la generación de energía en todo México.

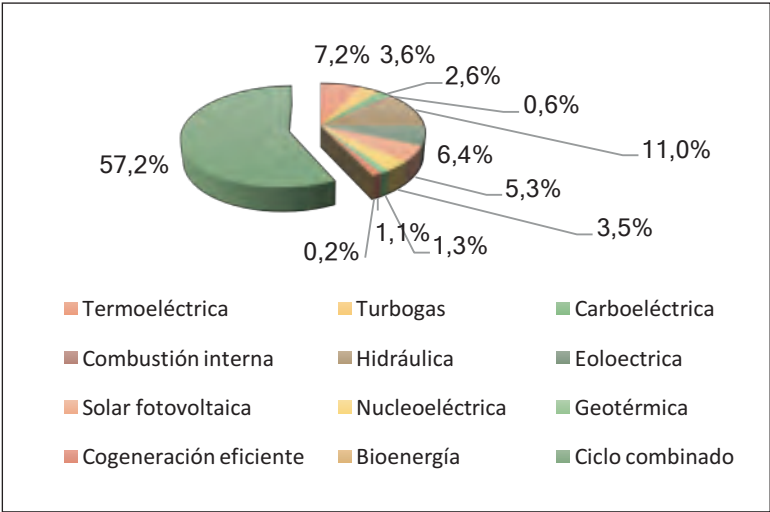


Figura 2. Matriz energética eléctrica de México, energías limpias

Nota: adaptada con datos del Centro Nacional de Control de Energía, CENACE.

La seguridad energética en su matriz

Esta energía no solo es limpia y renovable, sino que también podría proporcionar trabajo en el proceso de desarrollo y puesta en marcha de los lugares para poner los paneles solares. Si los combustibles fósiles son limitados, la energía solar es ilimitada y adicionalmente está libre de emisiones peligrosas para las personas y el medio ambiente, lo cual también la haría una alternativa efectiva para reducir la huella de carbono. Por tanto, con estas opciones, la creación de parques solares en Sonora no solo estará encaminada hacia el desarrollo de su economía, sino también dará un gran paso hacia la sostenibilidad ambiental. Por lo tanto, invertir en energía solar en esta región va más allá de simplemente adoptar una fuente de energía alternativa; está adoptando un futuro más limpio y responsable (SENER, Secretaría de Energía, 2023).

Sonora es uno de los estados que cuenta con los recursos para impulsar específicamente al subsector fotovoltaico. Se muestra que tiene un potencial solar de 12.874.2 PJ/año; sin embargo, tan solo se ha aprovechado el 0,3% de este recurso. La aplicación de energía solar a nivel local ha sido en los últimos años una opción interesante, ya que las condiciones de los recursos naturales, como la radiación que se recibe en la región, el escaso aprovechamiento de esta, y el incremento en el costo de la electricidad, han resultado en una reducción de los costos asociados a las tecnologías fotovoltaicas. Esto ha generado la proliferación del número de proyectos que se han asociado a este rubro.

Energía eólica Sonora

Sonora se beneficia de un notable nivel de radiación solar. Este fenómeno es consecuencia no solo de su ubicación, sino también de su topografía mayormente desértica, que reduce las obstrucciones que podrían disminuir la entrada de luz solar.

Por otra parte, los sistemas eólicos se integran de una o varias turbinas eólicas, las cuales están compuestas a su vez por el rotor, el generador y la torre; estos sistemas, además, cuentan con un dispositivo de control y protección. Las energías no contaminantes deben ser consideradas con precaución en cada uno de los puntos distribuidos del Sistema Eléctrico, que son: caso ideal, la producción de energía suficiente en cada uno de los

sistemas, el funcionamiento correcto de los equipos de generación, transmisión y distribución, en tiempo y forma, así como maximizar la entrega de energía a los puntos de consumo, mediante una buena gestión de la generación y de la red eléctrica que soporta la interconexión entre los diferentes sistemas, tanto desde un punto de vista técnico como económico. La energía eólica es un recurso renovable de origen natural, que responde favorablemente a los preceptos de la generación distribuida, basando su participación en la generación de energía eléctrica en un área predefinida y que, en general, ejerce un impacto ambiental mínimo.

Actualmente, la tecnología de energía eólica ha alcanzado un alto nivel de desarrollo técnico y comercial. En este sentido, se ha logrado el siguiente avance para su aplicación fuera de países desarrollado. Otro avance en la energía eólica está relacionado con el hecho de que la energía eólica es una de las fuentes de energía renovable de menor costo por este tipo de energía generada y su capacidad de disminuir el *ratio* de emisión de CO₂ por unidad de energía generada. Tales emisiones de CO₂ se dan en los países con cumplimiento de objetivos de generación de energía renovable, en mercados con propensión vendedora de contratos de energía eólica a largo plazo, integración empresarial y financiera con gas natural y con energía eléctrica, así como el desarrollo de la interconexión eléctrica.

Energía biomasa y geotérmica

Tanto la energía geotérmica como la biológica tienen un potencial considerable para la matriz energética de Sonora, un estado con condiciones geológicas y ambientales propicias para el desarrollo de estas fuentes renovables. El territorio sonorense tiene un gran potencial para la producción de energía geotérmica, debido a sus recursos térmicos geológicamente favorables. Actualmente existen estudios para discernir y evaluar los potenciales más significativos que colocarían a la zona como referente en cuanto al uso de este tipo de energía limpia y sostenible. En muchas zonas rurales de Sonora, la agricultura y la ganadería producen grandes volúmenes de residuos que pueden convertirse en biocombustibles o biogás. En este contexto, los proyectos que mejoren la recogida y el tratamiento de estos residuos servirán no solo para reducir la contaminación ambiental, sino también para producir recursos energéticos capaces de abastecer a comunidades enteras, lo que ayudaría a la autonomía de la propia población y al desarrollo rural sostenible (Silveira-Gramont et al., 2018).

A pesar de la notable abundancia de recursos renovables en el país, como la energía solar, eólica y geotérmica. La seguridad energética de México está en riesgo, sino que también expone a la economía a la inestabilidad de los precios en mercados internacionales. La necesidad de una transición urgente hacia energías más limpias no solo es una demanda ética, sino también estratégica, ya que alinearse con compromisos internacionales en la lucha contra el cambio climático resulta cada vez más imperativo para asegurar un futuro sustentable (Daniel et al., 2014).

Metodología

La deductiva cualitativa también incluye el enfoque metódico de este trabajo, el cual descompone un todo significativo en tantas partes como sea preciso para su investigación. El procedimiento es de abstracción, de encontrar nuevos aspectos y características. Posibilita el establecimiento de normas, procesos o secuencias con el fin de regular un cuerpo de investigación y ampliar el conocimiento que se posee acerca de un tema.

Los métodos de revisión en este trabajo sobre energías sostenibles en México poseen dos peculiaridades a considerar: son impracticables como alternativa para obtener la información necesaria de la totalidad de los objetos y reducen la incertidumbre de las generalizaciones solo parcialmente, o sea que su contribución es a través de su acumulación. Por lo tanto, a partir de un conjunto de métodos sintético-analíticos, el método de investigación de la revisión de literatura se proyecta hacia la obtención de nuevos modelos teóricos que permitan aportar nuevas miradas al objeto de este trabajo.

Al respecto, el propósito de este enunciado metodológico de cada uno de estos métodos se relaciona específicamente con la configuración descriptiva, analítica y sintética del conocimiento, partiendo de la recolección de material bibliográfico primario. Así las cosas, si bien cada método realiza una aportación específica, no es menos cierto que este se da permeado por todo el camino de la revisión de la literatura, las adaptaciones teóricas que se realicen y la consolidación de nuevos modelos y los criterios de selección.

Los criterios de selección incluyen:

- Paso siguiente: extracción de datos en bases de datos indexadas.
- La recolección de datos se realizará a través de la plataforma lens.org, reconocida por su riqueza de recursos académicos.

Los pasos en la selección metodológica incluyeron:

Al adoptar un enfoque riguroso y sistemático, esta investigación contribuye significativamente a la literatura existente y ofrece recomendaciones informadas para las partes interesadas relevantes. Seguir los pasos definidos garantizará un análisis de datos profundo y relevante, al tiempo que promoverá una comprensión más amplia de los desafíos y oportunidades que enfrenta el estado de Sonora en México.



Figura 3. Método y esquema descriptivo

Nota: elaboración propia.

Proyectos educativos y sociales

Estos proyectos en el plan Sonora no solo se limitan a mejorar la infraestructura escolar, sino que también incluyen programas para mejorar el acceso a la educación de las comunidades desatendidas. La integración de nuevas tecnologías en las aulas, la formación de docentes, así como la concesión de becas para apoyar la continuación de estudios son todas medidas implementadas. Un ejemplo emblemático es el programa público destinado a garantizar el acceso universal a la educación básica, que ha llevado a un aumento notable en la tasa de matrícula escolar.

Resultados

Se consultaron las bases de datos, encontrando los siguientes resultados frente a las obras para lograr la meta energética en Sonora, y la prospección energética generando procesos de apropiación social.

Proyectos de infraestructura

Construcción de la carretera Sonora-Sinaloa (Espinoza et al., 2020).

Descripción: mejora la conectividad entre Sonora y Sinaloa.

Inversión estimada: 800 millones de MXN.

Beneficiarios estimados: 1.200.000.

Renovación del Aeropuerto de Hermosillo.

Descripción: ampliación de terminal y mejora de servicios.

Inversión estimada: 350 millones de MXN.

Beneficiarios estimados: 1.000.000.

Sistema de drenaje en Nogales.

Descripción: prevención de inundaciones en temporada de lluvias.

Inversión estimada: 200 millones de MXN.

Beneficiarios estimados: 500.000.

Proyectos educativos.

Construcción de escuelas primarias

Descripción: nuevas escuelas en áreas rurales.

Inversión estimada: 150 millones de MXN.

Beneficiarios estimados: 2.500 alumnos.

Capacitación docente.

Descripción: programa de formación continua para maestros.

Inversión estimada: 100 millones de MXN.

Beneficiarios estimados: 3.000 maestros.

Implementación de aulas digitales.

Descripción: equipamiento tecnológico para 50 escuelas.

Inversión estimada: 75 millones de MXN.

Beneficiarios estimados: 10.000 alumnos.

Proyectos ambientales.

Reforestación del desierto de Sonora.

Descripción: plantación de 1 millón de árboles.

Inversión estimada: 50 millones de MXN.

Beneficiarios estimados: 300.000.

Manejo de residuos sólidos.

Descripción: implementación de programas de reciclaje.

Inversión estimada: 60 millones de MXN.

Beneficiarios estimados: 1.200.000.

Conservación del hábitat del jaguar.

Descripción: proyectos de protección de áreas naturales.

Inversión estimada: 90 millones de MXN.

Beneficiarios estimados: 250.000.

Proyectos Sociales

Centro de atención a la violencia.

Descripción: espacios de apoyo psicológico y legal.

Inversión estimada: 80 millones de MXN.

Beneficiarios estimados: 20.000 personas.

Programas de inclusión social.

Descripción: proyectos para comunidades indígenas.

Inversión estimada: 70 millones de MXN.

Beneficiarios estimados: 15.000 personas.

Feria del empleo.

Descripción: eventos trimestrales para promover el empleo.

Inversión estimada: 45 millones de MXN.

Beneficiarios estimados: 10.000 solicitantes.

Proyectos económicos (Ruiz et al., 2023)

Fomento al turismo en la costa de Sonora.

Descripción: desarrollo de infraestructura turística.

Inversión estimada: 200 millones de MXN.

Beneficiarios estimados: 150.000 visitantes.

Promoción de la agricultura sustentable.

Descripción: capacitación y tecnología para agricultores.

Inversión estimada: 120 millones de MXN.

Beneficiarios estimados: 8.000 productores.

Apoyo a emprendedores locales.

Descripción: programas de financiamiento y asesoría.

Inversión estimada: 65 millones de MXN.

Desde su inicio en 2015, el PEACCC llama por medidas reales y efectivas a apego que dañen los efectos del cambio climático. El gobierno estatal indica que un informe reciente ha reportado que una reducción del 20% de las emisiones actuales de gases de efecto invernadero se ha registrado en 2015, especialmente desde los sectores de energía y transporte. Este cambio radica en la transformación de la matriz energética y de transporte en la región (Gobierno Estatal Campeche, 2015).

Comparativa temporal: un análisis del progreso. El comparativo temporal de las emisiones en Sonora ofrece un panorama más alentador. Como se mencionó previamente, aquí la tendencia era de crecimiento sostenido. Por ejemplo, entre 2000 y 2023, la región, caracterizada por la rápida industrialización y la dependencia de los combustibles fósiles, aumentó sus emisiones de CO₂ a cerca de 26 millones de toneladas en 2023. Este incremento puede ser directamente atribuido a un modelo de desarrollo urbano, que, entre otros, priorizaba la expansión sin tomar en cuenta el impacto ambiental (Lugo-Gil, 2020).

La energía solar en Sonora, Puerto Peñasco

Puerto Peñasco se está consolidando como un pilar fundamental en la transición energética de México, la planta fotovoltaica más grande de Latinoamérica es una prueba palpable de esta transformación en sonora.

La planta fotovoltaica más grande de Latinoamérica, que se encuentra en sus cercanías, es un testimonio tangible de esta metamorfosis energética que está ocurriendo en la región.

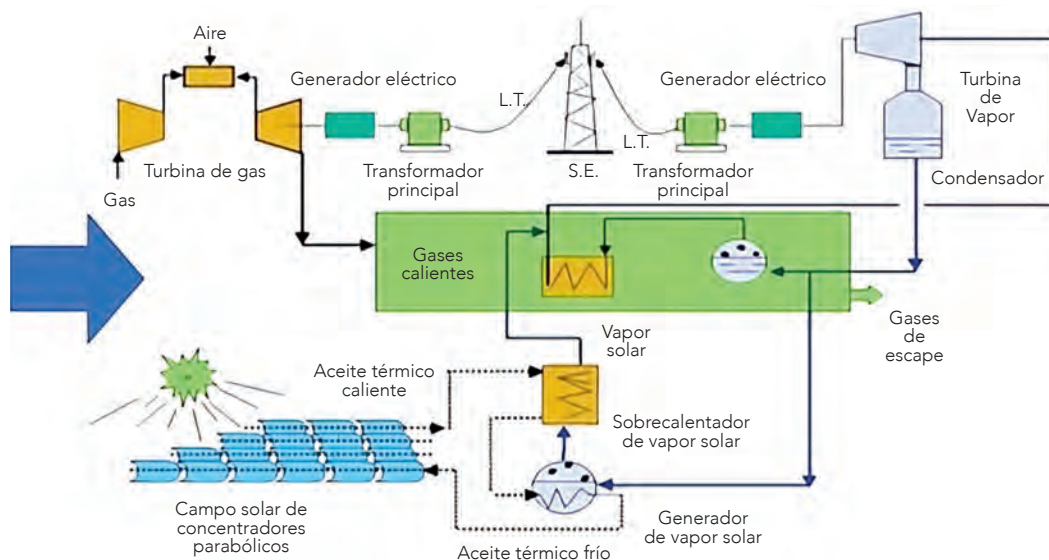


Figura 4. Diagrama ciclo combinado Agua prieta II

Nota: tomado de CFE 2010 Comisión Federal de Electricidad Proyecto 171.

La implementación de tecnologías que favorecen la conservación del agua subraya el compromiso del proyecto con la sostenibilidad ambiental y su responsabilidad social (CFE, 2010).

Resiliencia y futuro energético

Mirando hacia el futuro, la Central Agua Prieta II se establece como un modelo a seguir en el desarrollo de proyectos energéticos en el país. La capacidad de combinar energías tradicionalmente diversas en un sistema operativo eficiente y funcional puede ser replicada en otras regiones de México y del mundo, donde las condiciones geográficas y climáticas lo permitan.

Presentación detallada de casos representativos de proyectos de sostenibilidad en Sonora, destacando sus objetivos, acciones implementadas y resultados alcanzados. Bajo la investigación y recaudación de datos, Sonora

reafirma compromiso por un medio ambiente a través de proyectos en base a planes de energía sostenible en diferentes puntos del Estado para el apoyo de la economía de sus habitantes, aumentar el nivel de vida de los habitantes, elevar la competitividad de las regiones y abatir la pobreza en materia eléctrica.

Sonora tiene el potencial de las energías renovables, como lo son la hidráulica, eólica, solar fotovoltaica, termosolar, así como algunas otras. Determinar la situación actual y potencial del aprovechamiento de las fuentes renovables en el Estado, cuyo aprovechamiento no implica el consumo de materias primas.

Conclusiones

Los recursos energéticos que consume Sonora sí importan para lograr la sostenibilidad que México tanto requiere. Analizar los proyectos que van en curso o a futuro para un Sonora verde, sustentable, y con mejoramiento en infraestructura. Esta travesía hacia la sostenibilidad energética no solo beneficiará a Sonora, sino que también tendrá repercusiones positivas para todo México, configurando un país más fuerte, más resiliente y más comprometido con el futuro de nuestro planeta. Estudios desarrollados indican que los beneficios económicos y sociales de la energía sostenible en la región de Sonora son incuestionables. En primer lugar, un desarrollo de energía sostenible significaría reducir la dependencia de los combustibles fósiles y el aumento de los precios de la energía, lo que trae grandes ingresos a las economías domésticas y libera recursos que podrían ser invertidos en consumo adicional por persona y en la creación de empleo en estos sectores más intensivos. La creación de empleo en Sonora tendría impactos positivos en la demanda y en la oferta de bienes y servicios en la economía sonoreNSE, derivados del aumento del PIB fabricado directamente y de los ingresos locales adicionales. En segundo lugar, la mejora de las condiciones de oferta de energía tiene efectos multiplicadores muy importantes en el resto de la matriz industrial moderna de Sonora. La mayor competitividad en los precios de la energía permitiría el crecimiento de los sectores económicos centrados en Sonora, actuando directa o indirectamente sobre los sectores minero, metalúrgico, de hidrocarburos y, de modo sustancial, en el automotriz y en el comportamiento reciente del resto de la manufactura exportadora. Por último, el beneficio económico esperado por

el deterioro medioambiental resultante del impulso de sectores industriales más intensivos en emisiones deberá sopesarse con la mayor calidad de vida asociada al cambio de una matriz energética que reduciría las externalidades negativas del sistema industrial en general y energético en particular.

Uno de los proyectos en el Estado de Sonora es el proyecto 171 CC Agua Prieta II (con campo solar), la energía solar térmica o termosolar se basa en la concentración de los acoplados, cuya capacidad garantizada es de 394,1MW, con tecnologías de canales de espejos parabólicos termosolares. La capacidad de generación eléctrica podría ser suficiente para satisfacer toda la demanda del país, aunque es poco probable que esto ocurra en el corto plazo, dadas las limitaciones y desafíos que plantea un sistema energético con una alta proporción de energía renovable variable, a pesar de sus ventajas económicas.

El desarrollo de hidrógeno verde rentable se basa, en gran medida, en las plantas solares fotovoltaicas de Sonora. Dadas las previsiones de las tendencias actuales de reducción de los costos de la tecnología, es posible que la producción de hidrógeno verde para el año 2050 sea inferior a 1.5 USD/kg. Además, debe tenerse en cuenta que el hidrógeno verde no requerirá una cantidad significativa de agua en comparación con el consumo total del país. Por lo tanto, la producción de cantidades significativas de hidrógeno verde no afectará el suministro de agua en México ni el estado de Sonora.

Referencias

- Banco de Desarrollo de América del Norte. (2004). Proyecto para el Mejoramiento de la Calidad del Aire mediante la Pavimentación de calles en Nogales, Sonora. <https://www.nadb.org/es/nuestros-proyectos/proyectos-de-infraestructura/proyecto-para-el-mejoramiento-de-la-calidad-del-aire-mediante-la-pavimentacion-de-calles-en-nogales-sonora>
- Briones, F. (2012). *Perspectivas de investigación y acción frente al cambio climático en Latinoamérica*. https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Briones-2/publication/321038013_Perspectivas_de_investigacion_y_accion_frente_al_cambio_climatico_en_Latinoamerica/links/5a09de4c0f7e9bb949f965ac/Perspectivas-de-investigacion-y-accion-frente-al-cambio-climatico-en-Latinoamerica.pdf#page=119

- CEDES (Oficina de Cambio Climático y Promoción Ambiental). (2018). Caso de Éxito. Tema: *Medidas de mitigación o adaptación al cambio climático. La Estrategia de Crecimiento Verde en Sonora*. <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainabl>
- Centro Nacional de Control de Energía, CENACE. (2015). *Guía de referencia para interactuar en el nuevo mercado eléctrico*. Documento para el desarrollo de proyectos de cogeneración en México. www.giz.de/en/worldwide/33041.html
- CFE Comisión Federal de Electricidad. (2010). <https://documents1.worldbank.org/curated/ru/712381468049749407/pdf/E14220v10CD0LCR1EA1P066426v1.pdf>
- Congreso del Estado de Sonora. (2023). Aprueba Congreso acción para mitigar efectos del cambio climático <http://www.congresoson.gob.mx/Organizacion/Nota?id=3635>
- Daniel, I., Arriola, T., & Bringas, J. (2014). Estimación del potencial de energías renovables en el estado de Sonora. *Epistemos*, 8(17).
- Espinoza, F., Real, I., & Leyva, L. (2020). Características emprendedoras de los propietarios de las PyMES en Sonora. *Revista de Investigación Académica Sin Frontera: División de Ciencias Económicas y Sociales*, 33. <https://doi.org/10.46589/rdiasf.vi33.312>
- García-Guerrero, M. (2024). Esfuerzos de Ciencia Abierta en México. Mapeo de actores de ciencia ciudadana. *Revista Científica Retos de la Ciencia*, 8(17). <https://doi.org/10.53877/rc.8.17.20240101.7>
- Gil, C., & Enríquez, B. (2022). Socio environmental conflict and mining in Sonora, México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 37(2). <https://doi.org/10.24201/edu.v37i2.2028>
- Gobierno Estatal Campeche. (2015). *Programa Estatal ante el Cambio Climático*. <https://cambioclimatico.gob.mx/wp-content/uploads/2018/11/Documento-2-Programa-Estatal-ante-el-Cambio-Clim%C3%A1tico-2030-2015.pdf>
- Gobierno de Sonora. (2023). Gobernador Alfonso Durazo presenta el Plan Sonora de Energías Sostenibles a 132 diplomáticos en Puerto Peñasco. <https://plan.sonora.gob.mx/acciones-prueba/gobernador-alfonso-durazo-presenta-el-plan-sonora-de-energias-sostenibles-a-132-diplomaticos-en-puerto-penasco>
- Gobierno de Sonora. (2022). Plan Sonora de energías sostenibles. <https://economia-sonora.gob.mx/plan-sonora-de-energias-sostenibles/>

- Gobierno de Sonora. (2021). Energía Fotovoltaica. <https://plan.sonora.gob.mx/energia-fotovoltaica>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013). Sonora Conociendo México.
- Comisión Nacional de Energía del Programa Estatal Sonora. (2009). Ley de Fomento de Energías Renovables y Eficiencia Energética del Estado de Sonora Capítulo I Disposiciones Generales.
- Lens.org. (2024). Lens Version 8.9.8. <https://www.lens.org/?locale=es>
- Lugo-Gil, C. y Lara-Enríquez, B. (2020). El conflicto socioambiental en el río Sonora. Análisis de la acción colectiva de las organizaciones de la sociedad civil de 2014 a 2018. Estudios Sociales. *Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 30(55). <https://www.ciad.mx/estudiosociales/index.php/es/article/view/949>
- Martínez, M. (2021). Potencial energético de la digestión anaerobia del estiércol del ganado vacuno, porcino y avícola en Sonora (México). *LADEE*, 2(2). <https://doi.org/10.17981/ladee.02.02.2022.03>
- Mercado, L., & Marincic, I. (2017). Morfología de isla de calor urbana en Hermosillo, Sonora, y su aporte hacia una ciudad sustentable. *Biotecnia*, 19. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v19i0.407>
- OCMAL. (2019). *Mapa de conflictos mineros*. Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina, https://mapa.conflictosmineros.net/ocmal_db-v2/
- Ruelas, J., Lucero, B., Ríos, N., y García-Puch, B.. (2016). *Investigación y desarrollo de las energías renovables en Sonora y Baja California*. https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Investigacion_y_Desarrollo/vol2num5/Revista_de_Investigaci%C3%B3n_y_Desarrollo_V2_N5_1.pdf
- Ruiz, J. A., Valdez, L. E., Mexía, R., Acuña, F. J., & Camacho, L. E. (2023). La eco-innovación e innovación abierta, factor para elevar la reputación en las pymes de Sonora. *Invurnus*, 18(1). <https://doi.org/10.46588/invurnus.v18i1.92>
- SENER, Secretaría de Energía. (2023). *Programa de Desarrollo del sistema Eléctrico Nacional 2023-2037*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2023/CD008843.pdf>
- Silveira-Gramont, M. I., Aldana-Madrid, M. L., Piri-Santana, J., Valenzuela-Quintanar, A. I., Jasa-Silveira, G., & Rodríguez-Olibarria, G. (2018). Plaguicidas agrícolas: Un marco de referencia para evaluar riesgos a la salud en comunidades

rurales en el Estado de Sonora, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(1). <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.01>

Taddei, J., Navarrete, M., Taddei, P., Cabanillas, R. (2014). *Estimación del Potencial de Energías Renovables en el Estado de Sonora*. <https://biblat.unam.mx/hevila/EpistemusCienciatecnologiaysalud/2014/no17/13.pdf>

Este libro se terminó de editar y publicar
en el mes de julio de 2026 por el
Politécnico Grancolombiano,
en la ciudad de Bogotá, D. C., Colombia.



En un planeta que enfrenta la escasez de recursos como uno de sus mayores riesgos globales, la transformación de nuestros modelos energéticos y ambientales no es una opción, sino una urgencia. Frente a este panorama, la academia emerge no solo como un observador crítico, sino como un actor estratégico y dinámico en la búsqueda de soluciones sostenibles.

Este libro compila una rigurosa selección de investigaciones presentadas en el marco del I Congreso Internacional de Escasez Hídrica y Recursos Energéticos, celebrado en el Politécnico Grancolombiano. A través de sus páginas, el lector encontrará un diálogo profundo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), estructurado en tres ejes fundamentales: la generación de conocimiento y tecnología desde las aulas, la compleja interdependencia entre el agua y la energía en los territorios, y el diseño de soluciones basadas en la medición y la toma de decisiones informadas.

Más que un compendio de respuestas definitivas, esta obra es una invitación abierta a articular la formación, la investigación y la gestión. Una lectura indispensable para comprender cómo la ciencia local y global construye el camino hacia la transición y la sostenibilidad.