



# Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica

Volumen 28 - Número 81  
Julio - Septiembre de 2024

p-ISSN: 0123-921X  
e-ISSN: 2248-7638



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

**Revista TECNURA**  
**Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento**  
**Universidad Distrital Francisco José de Caldas**  
**Facultad Tecnológica**

p-ISSN: 0123-921X - e-ISSN: 2248-7638

## EDITORIA

Ph.D. Lely Adriana Luengas Contreras  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

## EDITORES ASISTENTES

MSc. Ronald González Silva  
Carlos David Ballén Ladino

## COMITÉ EDITORIAL-CIENTÍFICO

Jimmy Barco Burgos Ph.D  
Concordia University, Canada

Mario Ricardo Arbulu Saavedra, Ph.D. Ing  
Corporación Universitaria del Huila.

Martín Pedro Gómez, Ph.D.  
Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina.

Oreste Piro, Ph.D.  
Universidad de les Illes Balears. España.

Manuel Karim Sapag, Ph.D. Ing  
Universidad Nacional de San Luis, Argentina.

Fernando Martirena, Ph.D. Ing  
Universidad Central de Las Villas, Cuba.

Adriana Martínez Hernández, Ph.D. Ing  
Universidad Iberoamericana, México.

Alma De León Hernández, Ph.D. IngPh.D  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Miguel Ángel Padilla Castañeda, Ph.D.  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Joao Vidal de Carvalho, Ph.D.  
Instituto Politécnico do Porto Escola Superior de Educação,  
Portugal.

## EVALUADORES

Enrique Rodríguez de la Colina  
Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Luis Hernando Concha Rodríguez  
Universidad ECCI, Colombia.

Jorge Arturo Pineda Jaimes  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Juan Vorobioff  
Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

Yeison Castro Duque  
Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia.

Óscar Andrés Tobar Rosero  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Fred Ignacio Camus Yeomans  
Universidad de La Serena, Chile.

Yasuanna Katyuska Britto López  
Fundación Universitaria del Área Andina, Colombia.

## COORDINACIÓN EDITORIAL

Fernando Piraquive  
Oficina de Investigaciones  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

## REVISTA TECNURA

La revista Tecnura es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de carácter científico-tecnológico, arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

## PERIODICIDAD

Es una publicación de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

## COBERTURA TEMÁTICA

Las áreas temáticas de interés de la revista Tecnura están enfocadas a todos los campos de la ingeniería, como la electrónica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecánica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe únicamente a estas, también tienen cabida los temas de educación y salud, siempre y cuando estén relacionados con la ingeniería. La revista publicará únicamente artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión y de revisión.

## MISIÓN

La revista Tecnura tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de la ingeniería, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado.

## PÚBLICO OBJETIVO

La revista Tecnura está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de la ingeniería.

## INDEXACIÓN

Tecnura es una publicación de carácter académico indexada en los índices regionales pubindex indexada y clasificada en categoría B, Scielo Colombia y Redalyc (México); además de las siguientes bases bibliográficas: INSPEC del Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Académica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), IndexCorpernicus (Polonia), Informe Académico de Gale Cengage Learning (México), Periódica de la Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (España) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (España); también hace

parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Latindex (México); Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

## FORMA DE ADQUISICIÓN

La revista Tecnura se puede adquirir a través de canje o suscripción en el portal de la de la revista.

## REPRODUCCIÓN

Se autoriza la reproducción total o parcial de los artículos de esta revista para uso académico o interno de las instituciones citando la fuente y el autor. Las ideas expresadas se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial de la revista.

## DIRECCIÓN POSTAL

Enviar a Ph.D. Lely Adriana Luengas Contreras  
Director y Editor Revista Tecnura  
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305  
Facultad Tecnológica  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Dirección: Cl. 68d Bis A Sur # 49 F - 70, Bogotá  
Teléfono: 571-3239300  
Bogotá, D.C., Colombia  
Correo electrónico:  
[tecnura.ud@udistrital.edu.co](mailto:tecnura.ud@udistrital.edu.co)  
Tecnura en internet:  
<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

## CORRECCIÓN DE ESTILO PARA ESPAÑOL

MSc. Fernando Carretero Padilla

## CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLÉS

MSc. Alexander Olave

## DISEÑO DE CUBIERTA

Andrés Enciso

## DIAGRAMACIÓN Y DISEÑO L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X\*

MSc. Julian Arcila-Forero

\*Modificada bajo las condiciones del LaTeX Project Public License  
<http://www.latex-project.org/lppl.txt>



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

**TECNURA Journal**  
**Technology And Culture, Affirming Knowledge**  
**District University Francisco José De Caldas**  
**Faculty Of Technology**

p-ISSN: 0123-921X - e-ISSN: 2248-7638

## EDITOR

Ph.D. Lely Adriana Luengas Contreras  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

## ASSISTANT EDITOR

MSc. Ronald González Silva  
Carlos David Ballén Ladino

## EDITORIAL-SCIENTIFIC COMMITTEE

Jimmy Barco Burgos Ph.D  
Concordia University, Canada

Mario Ricardo Arbulu Saavedra, Ph.D. Ing  
Corporación Universitaria del Huila.

Martín Pedro Gómez, Ph.D.  
Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina.

Oreste Piro, Ph.D.  
Universidad de les Illes Balears. España.

Manuel Karim Sapag, Ph.D. Ing  
Universidad Nacional de San Luis, Argentina.

Fernando Martirena, Ph.D. Ing  
Universidad Central de Las Villas, Cuba.

Adriana Martínez Hernández, Ph.D. Ing  
Universidad Iberoamericana, México.

Alma De León Hernández, Ph.D. IngPh.D  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Miguel Ángel Padilla Castañeda, Ph.D.  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Joao Vidal de Carvalho, Ph.D.  
Instituto Politécnico do Porto Escola Superior de Educação,  
Portugal.

## EVALUATORS

Enrique Rodríguez de la Colina  
Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Luis Hernando Concha Rodríguez  
Universidad ECCI, Colombia.

Jorge Arturo Pineda Jaimes  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Juan Vorobioff  
Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

Yeison Castro Duque  
Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia.

Óscar Andrés Tobar Rosero  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Fred Ignacio Camus Yeomans  
Universidad de La Serena, Chile.

Yasuanna Katyuska Britto López  
Fundación Universitaria del Área Andina, Colombia.

## EDITORIAL COORDINATION

Fernando Piraquive  
Oficina de Investigaciones  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas



## TECNURA JOURNAL

Tecnura Journal is an institutional scientific-technological publication from the Faculty of Technology at District University Francisco José de Caldas, arbitrated by means of a double-blinded peer review process. The periodicity for its Scientific and Editorial committees line-up is subject to the publication of articles in internationally indexed magazines by its own members.

## PERIODICITY

Tecnura journal is a scientific-technological publication with quarterly periodicity, published in January, April, July and October. Its first edition appeared in the second term, 1997 and its editions have normally continued from that year and on.

## THEMATIC COVERAGE

The thematic areas of interest at Tecnura journal are focused on all fields of engineering such as electronical, telecommunications, electrical, computer, industrial, mechanical, cadastral, civil, environmental, etc. However, it is not restricted to those, there is also room for education and health topics as well, as long as they are related to engineering. The journal will only publish scientific and technological research, reflection and review articles.

## MISSION

Tecnura journal is aimed at publishing research project results carried out in the field of engineering, through the publishing of original and unpublished articles written by academics and professionals from national or international public or private institutions.

## TARGET AUDIENCE

Tecnura journal is directed to professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and the monitoring of the scientific-technological research processes in the field of engineering.

## INDEXING

Tecnura is an academic publication indexed in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); as well as the following bibliographic databases: INSPEC of the Institution of Engineering and Technology (England), Fuente Académica Premier of EBSCO (United States), CABI (England), Index Copernicus (Poland), Informe Académico of Gale Cengage Learning (México), Periódica of the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet of the Universidad de la Rioja (Spain); it is also part of the

following directories: Online Regional Information System for Scientific journals from Latin America, Caribbean, Spain and Portugal Latindex (México), bibliographic index Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Spain), DOAJ (Sweden), Ulrich of Proquest (United States).

## FORM OF ACQUISITION

Tecnura journal is available through purchase, exchange or subscription.

## REPRODUCTION

The total or partial reproduction of the articles of this journal is authorized for academic or internal purpose of the institutions citing the source and the author. Ideas expressed are published under exclusive responsibility of the authors and they do not necessarily reflect the thought of the editorial committee of the journal.

## POSTAL ADDRESS

Enviar a Ph.D. Lely Adriana Luengas Contreras  
Director y Editor Revista Tecnura  
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305  
Facultad Tecnológica  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Dirección: Cl. 68d Bis A Sur # 49 F - 70, Bogotá  
Teléfono: 571-3239300  
Bogotá, D.C., Colombia  
E-mail:  
[tecnura.ud@udistrital.edu.co](mailto:tecnura.ud@udistrital.edu.co)  
Tecnura on internet:  
<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

## STYLE CORRECTION IN SPANISH

MSc. Fernando Carretero Padilla

## STYLE CORRECTION IN ENGLISH

MSc. Alexander Olave

## TITLE PAGE DISEGN

Andrés Enciso

## LAYOUT AND L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X\* DESIGN

MSc. Julian Arcila-Forero

\* modified under the conditions of the LaTeX Project Public License  
<http://www.latex-project.org/lppl.txt>

El comité editorial de la revista **Tecnura** está comprometido con altos estándares de ética y buenas prácticas en la difusión y transferencia del conocimiento, para garantizar el rigor y la calidad científica. Es por ello que ha adoptado como referencia el Código de Conducta que, para editores de revistas científicas, ha establecido el Comité de Ética de Publicaciones (COPE: Committee on Publication Ethics) dentro de los cuales se destaca:

## Obligaciones y responsabilidades generales del equipo editorial

En su calidad de máximos responsables de la revista, el comité y el equipo editorial de **Tecnura** se comprometen a:

- Aunar esfuerzos para satisfacer las necesidades de los lectores y autores.
- Propender por el mejoramiento continuo de la revista.
- Asegurar la calidad del material que se publica.
- Velar por la libertad de expresión.
- Mantener la integridad académica de su contenido.
- Impedir que intereses comerciales comprometan los criterios intelectuales.
- Publicar correcciones, aclaraciones, retractaciones y disculpas cuando sea necesario.

## Relaciones con los lectores

Los lectores estarán informados acerca de quién ha financiado la investigación y sobre su papel en la investigación.

## Relaciones con los autores

**Tecnura** se compromete a asegurar la calidad del material que publica, informando sobre los objetivos y normas de la revista. Las decisiones de los editores para aceptar o rechazar un documento para su publicación se basan únicamente en la relevancia del trabajo, su originalidad y la pertinencia del estudio con relación a la línea editorial de la revista. La revista incluye una descripción de los procesos seguidos en la evaluación por pares de cada trabajo recibido. Cuenta con una guía de autores en la que se presenta esta información. Dicha guía se actualiza regularmente y contiene un vínculo a la presente declaración ética. Se reconoce el derecho de los autores a apelar las decisiones editoriales. Los editores no modificarán su decisión en la aceptación de envíos, a menos que se detecten irregularidades o situaciones extraordinarias. Cualquier cambio en los miembros del equipo editorial no afectará las decisiones ya tomadas, salvo casos excepcionales en los que confluyan graves circunstancias.

## Relaciones con los evaluadores

**Tecnura** pone a disposición de los evaluadores una guía acerca de lo que se espera de ellos. La identidad de los evaluadores se encuentra en todo momento protegida, garantizando su anonimato.

## Proceso de evaluación por pares

**Tecnura** garantiza que el material remitido para su publicación será considerado como materia reservada y confidencial mientras que se evalúa (doble ciego).

## Reclamaciones

**Tecnura** se compromete responder con rapidez a las quejas recibidas y a velar para que los demandantes insatisfechos puedan tramitar todas sus quejas. En cualquier caso, si los interesados no consiguen satisfacer sus reclamaciones, se considera que están en su derecho de elevar sus protestas a otras instancias.

## Fomento de la integridad académica

**Tecnura** asegura que el material que publica se ajusta a las normas éticas internacionalmente aceptadas.

## Protección de datos individuales

**Tecnura** garantiza la confidencialidad de la información individual (por ejemplo, de los profesores y/o alumnos participantes como colaboradores o sujetos de estudio en las investigaciones presentadas).

## Seguimiento de malas prácticas

**Tecnura** asume su obligación para actuar en consecuencia en caso de sospecha de malas prácticas o conductas inadecuadas. Esta obligación se extiende tanto a los documentos publicados como a los no publicados. Los editores no sólo rechazarán los manuscritos que planteen dudas sobre una posible mala conducta, sino que se consideran éticamente obligados a denunciar los supuestos casos de mala conducta. Desde la revista se realizarán todos los esfuerzos razonables para asegurar que los trabajos sometidos a evaluación sean rigurosos y éticamente adecuados.

## Integridad y rigor académico

Cada vez que se tenga constancia de que algún trabajo publicado contiene inexactitudes importantes, declaraciones engañosas o distorsionadas, debe ser corregido de forma inmediata.

En caso de detectarse algún trabajo cuyo contenido sea fraudulento, será retirado tan pronto como se conozca, informando inmediatamente tanto a los lectores como a los sistemas de indexación.

Se consideran prácticas inadmisibles, y como tal se denunciarán las siguientes: el envío simultáneo de un mismo trabajo a varias revistas, la publicación duplicada o con cambios irrelevantes o parafraseo del mismo trabajo, o la fragmentación artificial de un trabajo en varios artículos.

## Relaciones con los propietarios y editores de revistas

La relación entre editores, editoriales y propietarios estará sujeta al principio de independencia editorial. **Tecnura** garantizará siempre que los artículos se publiquen con base en su calidad e idoneidad para los lectores, y no con vistas a un beneficio económico o político. En este sentido, el hecho de que la revista no se rija por intereses económicos, y defienda el ideal de libre acceso al conocimiento universal y gratuito, facilita dicha independencia.

## Conflicto de intereses

**Tecnura** establecerá los mecanismos necesarios para evitar o resolver los posibles conflictos de intereses entre autores, evaluadores y/o el propio equipo editorial.

## Quejas/denuncias

Cualquier autor, lector, evaluador o editor puede remitir sus quejas a los organismos competentes

The editorial board of *Tecnura* journal is committed to ethics high standards and good practice for knowledge dissemination and transfer, in order to ensure rigour and scientific quality. That is why it has taken as reference the Code of Conduct, which has been established by the Committee on Publication Ethics (COPE) for scientific journal editors; outlining the following:

## General duties and responsibilities of the editorial board

As most responsible for the journal, **Tecnura** committee and the editorial board are committed to:

- Joining efforts to meet the readers and authors' needs.
- Tending to the continuous improvement of the Journal.
- Ensuring quality of published material.
- Ensuring freedom of expression.
- Maintaining the academic integrity of their content.
- Prevent commercial interests compromise intellectual standards.
- Post corrections, clarifications, retractions and apologies when necessary.
- Relations with readers.
- Readers will be informed about who has funded re- search and their role in the research.

## Relations with authors

*Tecnura* is committed to ensuring the quality of published material, informing the goals and standards of the journal. The decisions of publishers to accept or reject a paper for publication are based solely on the relevance of the work, originality and pertinence of the study with journal editorial line. The journal includes a description of the process for peer evaluation of each received work, and has an authors guide with this information. The guide is regularly updated and contains a link to this code of ethics. The journal recognizes the right of authors to appeal editorial decisions. Publishers will not change their decision in accepting or rejecting articles, unless extraordinary circumstances or irregularities are detected. Any change in the editorial board members will not affect decisions already made, except for unusual cases where serious circumstances converge.

## Relations with evaluators

*Tecnura* makes available to reviewers a guide to what is expected from them. Reviewers' identity is protected at all times, ensuring anonymity.

## Peer review process

**Tecnura** ensures that material submitted for publication will be considered private and confidential issue while being reviewed (double blind).

## Claims

*Tecnura* is committed to respond quickly to complaints and ensure that dissatisfied claimant can process all complaints. In any case, if applicants fail to satisfy their claims, the journal considers that they have the right to raise their protests to other instances.

---

## Promoting Academic Integrity

**Tecnura** ensures that the published material conforms to internationally accepted ethical standards.

## Protection of individual data

**Tecnura** guarantees the confidentiality of individual information (e.g. participant teachers and/or students as collaborators or subjects of study in the presented research).

## Tracking malpractice

**Tecnura** accepts the obligation to act accordingly in case of suspected malpractice or misconduct. This obligation extends both to published and unpublished documents. The editors not only reject manuscripts with doubts about possible misconduct, but they are considered ethically obligated to report suspected cases of misconduct. From the journal every reasonable effort is made to ensure that works submitted for evaluation are rigorous and ethically appropriate.

## Integrity and academic rigour

Whenever evidence that a published work contains significant misstatements, misleading or distorted statements, it must be corrected immediately.

In case of any work with fraudulent content is detected, it will be removed as soon as it is known, and immediately informing both readers and indexing systems.

Practices that are considered unacceptable and as such will be reported: simultaneous sending of the same work to various journals, duplicate publication with irrelevant changes or paraphrase of the same work, or the artificial fragmentation of a work in several articles.

## Relations with owners and journal editors

The relation between editors, publishers and owners will be subject to the principle of editorial independence. **Tecnura** will ensure that articles are published based on their quality and suitability for readers, and not for an economic or political gain. In this sense, the fact that the journal is not governed by economic interests, and defends the ideal of universal and free access to knowledge, provides that independence.

## Conflict of interest

**Tecnura** will establish the necessary mechanisms to avoid or resolve potential conflicts of interest between authors, reviewers and/or the editorial board itself.

## Complaints / allegations

Any author, reader, reviewer or editor may refer their complaints to the competent authorities.

## Signal Quality of a Wideband SDR Transceiver Under Varying Frequency Deviation

12

Calidad de la señal de un transceptor SDR de banda ancha al variar la desviación de frecuencia

Hernán Paz Penagos

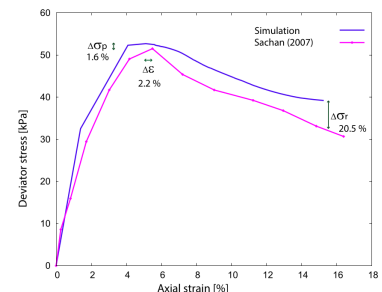


## Blocks size effect on the shear strength of bimsoils with low volumetric blocks proportion

30

Efecto del tamaño de bloques en la resistencia al corte de suelos con bloques (bimsoils) de bajas proporciones volumétricas

Campos-Muñoz., D.D., Ramos-Cañón., A.M. y Prada-Sarmiento., L.F.

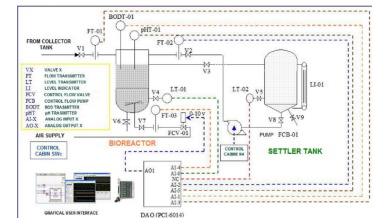


## Design and Testing of a Density Sensor for Biological Wastewater Treatment in a Pilot Plant

54

Diseño y prueba de un sensor de densidad para el tratamiento biológico de aguas residuales en una planta piloto

José Aldemar Muñoz Hernández, Helmer Muñoz Muñoz Hernández, Kavir Alá Oviedo Prioló y Roberto Carlos Osorio Mass

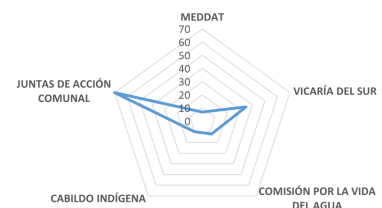


## Socio-environmental organizations in defense of the territory against energy mining extractives in the department of Caquetá

67

Organizaciones socioambientales en defensa del territorio, frente al extractivismo minero-energético en el departamento de Caquetá (Colombia)

Mercedes Mejía Leudo



## Technical requirements for digitisation of electrical substations in stages and their testing for application march

86

Requerimientos técnicos de la digitalización de subestaciones eléctricas por etapas y sus pruebas para la puesta en marcha

Juan Camilo Bolaños Espín, Francisco Julián Pereira Otero y Eduardo Gómez-Luna



## Environmental impact of artisanal limestone mining in the department of La Guajira, Colombia

106

Impacto ambiental de la minería artesanal de caliza en el departamento de La Guajira, Colombia

Michelle Cristine Velásquez Móvil, Yazmín Adriana Mendoza Páez y Danny Daniel Eduardo Gómez-Luna

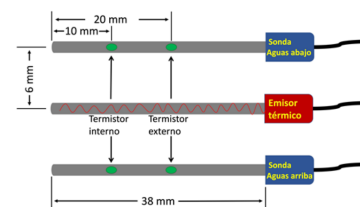


## Design and calibration of a low-cost device for measuring sap flow in forest species

123

Diseño y calibración de un dispositivo de bajo costo para la medición del flujo de savia en especies forestales

Ana Milena López-Aguirre y Alonso Barrios-Trilleras



## Instrucciones para los autores

147

## Instructions for authors

160



## Signal Quality of a Wideband SDR Transceiver Under Varying Frequency Deviation

### Calidad de la señal de un transceptor SDR de banda ancha al variar la desviación de frecuencia

Hernán Paz Penagos <sup>1</sup>

Fecha de Recepción: 27 de enero de 2023

Fecha de Aceptación: 16 de septiembre de 2024

**Cómo citar:** Paz Penagos H. Calidad de la señal de un transceptor SDR de banda ancha al variar la desviación de frecuencia. *Tecnura*, 28(81), 12-29. <https://doi.org/10.14483/22487638.20411>


## Abstract

This study examines the quality of an audio signal received via a Software-Defined Radio (SDR) peripheral for Wideband Frequency Modulation (WBFM). The objective is to evaluate the impact of varying the maximum frequency deviations of the modulator, through the WBFM transmit block, on audio quality. Tests were conducted in an open space at a fixed distance of 50 meters using a chirp signal and an audio file in .WAV format as messages. Signal quality was evaluated using the RMAA 6.1.4 Right Mark Audio Analyzer and SDR# spectrum analyzer, with a 16-bit resolution and a 96 kHz sampling rate. Key performance parameters included: total harmonic distortion (THD), peak power (Pp), frequency response (RF), and signal-to-noise ratio (SNR). Results indicate high-quality reception under specific conditions:  $THD \leq 2\%$ ,  $Pp \geq 2.7$  dBFS, RF at 13 kHz, and  $SNR \geq 39$  dB. Optimal performance was observed with a frequency deviation of 75 kHz, highlighting HackRF One's suitability for WBFM transmission. This work demonstrates SDR's flexibility in modulating and demodulating signals, providing a low-cost and efficient alternative for audio transmission. The study was funded by the Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito under code PRY18, 2018-1.

**Keywords:** broadband frequency modulation, GNU radio, modulation rate, signal quality, software-defined radio

## Resumen

Este estudio analiza la calidad de una señal de audio recibida en un periférico de radio definido por software (SDR) para aplicaciones de modulación de frecuencia de banda ancha (WBFM). El objetivo es evaluar el impacto que tiene la variación de las desviaciones máximas de frecuencia del modulador, a través del bloque de transmisión WBFM, en la calidad de la señal. Las pruebas se realizaron en un espacio abierto a una distancia fija de 50 metros, utilizando una señal chirp y un archivo de audio en formato .WAV como mensajes. Se emplearon los programas RMAA 6.1.4 Right Mark Audio Analyzer y SDR# spectrum analyzer con resolución de 16 bits y frecuencia

<sup>1</sup>Electronic Engineer, Electrical Engineer, Ph.D. in Education Department of Electronic Engineering. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  Bogotá D.C, Colombia.. Email: [hernan.paz@escuelaing.edu.co](mailto:hernan.paz@escuelaing.edu.co)



de muestreo de 96 kHz para evaluar los parámetros: distorsión armónica total (THD), potencia pico (Pp), respuesta en frecuencia (RF) y relación señal/ruido (SNR). Los resultados demuestran una recepción de alta calidad bajo condiciones específicas:  $THD \leq 2\%$ ,  $P_p \geq 2,7$  dBFS, RF a 13 kHz y  $SNR \geq 39$  dB. Se observó el mejor desempeño con una desviación de frecuencia de 75 kHz, lo cual destaca la eficacia del HackRF One para transmisión WBFM. Este trabajo fue financiado por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito bajo el código PRY18, 2018-1.

**Palabras clave:** modulación de frecuencia de banda ancha, radio GNU, tasa de modulación, calidad de la señal, radio definida por software.

---

## Introduction

The current trend in technology is based on integrating various forms of communication into a single device. Software-Defined Radio (SDR) simplifies hardware requirements by enabling the implementation of different types of communication using the same hardware, with modifications limited to software changes. This flexibility has significantly contributed to the development of low-cost projects.

A number of studies have leveraged this advantage to explore innovative SDR-based solutions across various applications. [Natarajan and Devi \(2017\)](#) reviewed recent trends in SDR design and applications; [Narayana et al. \(2018\)](#) designed a wideband FM receiver using RTL-SDR and a Raspberry PI; [Dharani and Vaitheeswari \(2020\)](#) designed an SDR transceiver for industrial automation; [Jen-Wei et al. \(2003\)](#) used an FPGA to create an n-channel arbitrary waveform generator. Subsequently, [Mejías et al. \(2015\)](#) introduced an improved approach based on a Direct Digital Synthesizer using an FPGA. In both of these latter cases, the maximum frequency of the generator was determined to be less than 100 MHz.

Similarly, [Jovanovic et al. \(2011\)](#) implemented an RF generator for SDR-based amplitude shift keying (ASK) and frequency shift keying (FSK) receivers using a microprocessor-controlled digital synthesizer, achieving a maximum frequency of 400 MHz and a dynamic range of 130 dB. In another study, [Hapsari and Ismail \(2021\)](#) evaluated the performance of the SDR with the QAM technique.

Marcus Leech developed two inexpensive radio telescope designs using the RTL-SDR at Science Radio Laboratories. His 2012 study, titled "A 21 cm Radio Telescope for the Cost-Conscious", documents the construction of a telescope that manages to observe the spectrum in the galactic plane, as well as the spectral line of hydrogen in various parts of the plane. With this device, spatial radio frequency signals are converted to baseband and then digitized at one or two mega-samples per second, enabling diverse types of experimental data to be extracted via computer processing.

A similar project, titled "Enhancing Low-Cost Ozone Spectrometers to Measure Mesospheric Winds and Tides" (Alam & Rogers, 2015), was conducted by Cornell University and MIT Haystack Observatory. This initiative aimed to develop an ozone spectrometer using RTL-SDR technology to measure winds and tides in the mesosphere. The spectrometer was constructed from a 46,72 cm diameter TV reflector satellite, a noise reduction converter, two high pass filters, two 8 dB attenuators, and three RTL-SDRs. This configuration enabled the observation of the 11,02 GHz spectral line of ozone, allowing for the measurement of ozone gas concentration, velocity, and temperature in the mesosphere.

Various SDR devices have been used in the study of different types of communications and modulations due to their ability to analyze signal spectra through simple adjustments. Moreover, they allow for the extraction of signal characteristics using open-source software (Rischke, J., & Salah, H., 2020; Shaik, P., et al., 2019; Allahvirdi-Zadeh, A., 2021; Feng, S., et al., 2020). The flexibility of SDR systems makes them particularly suitable for mobile telephony terminals, where various protocols and wireless transmission technologies coexist and are continually being updated. Table 1 presents a selection of SDR devices.

**Table 1.** SDR equipment available

SDR Hardware	Range (MHz)	ADC (bits)	AB (MHz)	RX	Tx
RTL2832U	24 - 1766	8	3	V	V
FunCube Pro+	0,15 - 2000	16	0,192	V	X
AirSpy	24 - 1750	12	10	V	X
XiOne	0,1 - 1750	8	3,2	V	X
SDR Play	0,1 - 2000	12	8	V	X
HackRF One	10 - 6000	8	20	V	V
MyriadRF	300 - 3800	12	28	V	V
BladeRF	300 - 3800	12	28	V	V
USRP B200	70 - 6000	12	56	V	R
USRP B210	70 - 6000	12	56	Vx2	Vx2
ASRP1	400 - 4400	12	8	Vx2	Vx2
Pervices Noctar	0,1 - 4400	12	250	V	V
Pervices Crimson	0,1 - 6000	16	800	Vx4	Vx4
Signal Hound BB60C	0,009 - 6000	14	27	V	X

**Source:** Own elaboration.

For this project, the open-source SDR hardware HackRF One was used to implement the WBFM transmitter/receiver (see Figure 1). This device was selected due to its capacity to sup-

port various types of digital signal processing and to facilitate the modification of operational variables—such as frequency deviation—through software. This flexibility allows for evaluating different responses of interest using the same hardware configuration.



Figure 1. HackRF One

Source:

<https://www.amazon.com/-/es/hackrf-Software-Defined-ant500-Antena-Bundle/dp/B01H3T2U7G>

HackRF One allows: (1) process the information, (1.1) attach the message to the channel (bit-to-radio waves on the transmitter), and (1.2) retrieve the transmitted message (as radio-to-bit waves on the receiver).

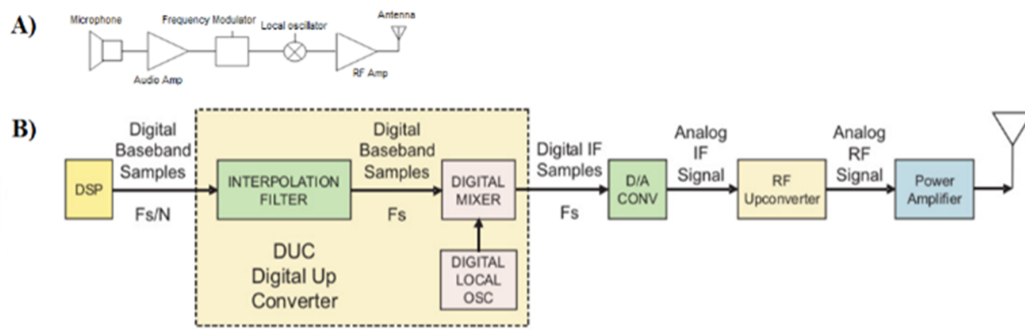
## Reference Framework

In general, for applications involving broadcast radio transmission and reception, the SDR architecture is organized into the following stages:

- i.* **The RF Front-End header:** This section is responsible for the capture of the radio signal and its adaptation to the input characteristics of the digital-to-analog converter.
- ii.* **Baseband section:** This section is responsible for: (i) digitization of the IF signal through a digital-to-analog converter, (ii) signal filtering for noise suppression, (iii) signal amplification (from microvolts to volts), (iv) modulation of the signal to baseband using a digital down converter module (DDC), and (v) the decrease of the sampling rate (decimation) to adapt to the data transmission capacity of the bus that communicates with the processing section. Functions 1 to 4 are performed at high speed, which is determined by the sample rate of the digital-to-analog converter.

iii. **Processing section:** In this section, the baseband digital signal is processed at a low speed by a software application. Typically, this section is implemented by a general-purpose processor integrated into a personal computer (Mishra *et al.*, 2017).

Figure 2 shows an analog FM transmitter and its difference from an SDR FM transmitter.



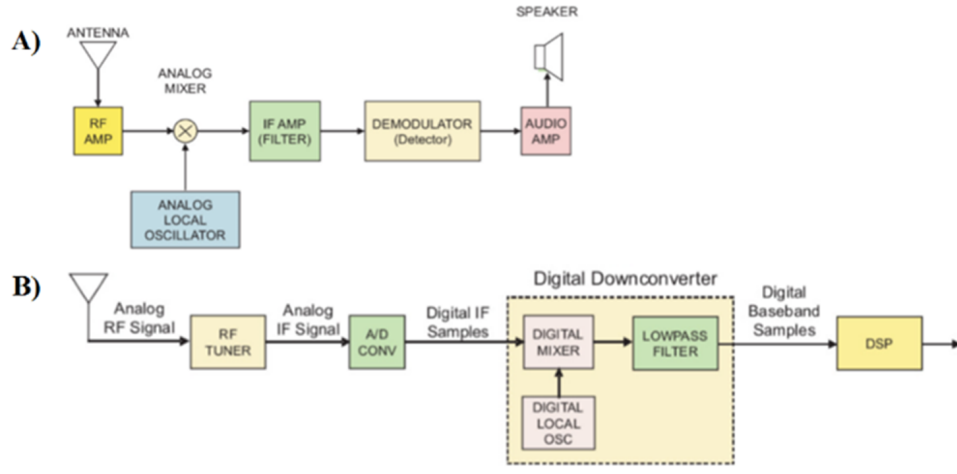
**Figure 2.** Analog FM transmitter (A) vs. RDS FM transmitter (B)

**Source:** GNU radio block diagrams.

Recent developments in SDR technology have also explored the use of programmable metasurfaces to reduce hardware complexity in wireless communication systems. Tang *et al.* (2020) present a study on the use of programmable metasurfaces as RF-free transmitters and spatial down-conversion receivers. This approach can decrease complexity, cost, and power consumption in systems operating at higher frequencies, with a proof-of-concept 2x2 MIMO transmission at 20 Mb/s using 16QAM modulation and frequency conversion at 5 MHz. Future research may focus on integrating these metasurfaces with advanced modulation schemes like OFDM to enhance performance and extend the application scope to 6G networks (Tang *et al.*, 2020).

Figure 3 illustrates the differences between a traditional analog FM receiver and an FM SDR receiver. SDR hardware allows encoding of the voltage values received by the antenna (radio frequency header) (Akeela & Dezfouli, 2018), which is used to convert the signal into bits (using an ADC) and deliver them to a computer for information.

GNU Radio is a free and open-source development environment (GNU Radio, 2021) that facilitates the implementation of various physical layer functions (modulation/demodulation, time and frequency synchronization, channel coding, etc.) using blocks and graphs programmed in C++ or Python (Krishnan *et al.*, 2017). GNU Radio's graphical interface comprises four primary components: the toolbar, workspace, block library, and console. In WBFM applications, user-configurable blocks like nb\_fm\_tx.py and wf\_fm\_tx.py manage FM modulation and demodulation.



**Figure 3.** Analog FM receiver (A) vs. SDR FM receiver (B)

**Source:** [GNU radio block diagrams](#).

Recent research emphasizes deep learning (DL) techniques for improving automatic modulation recognition (AMR) in SDR systems. Wang *et al.* (2022) reviewed the evolution of DL-based AMR techniques, categorizing them into CNN-based, RNN-based, DBN-based, and hybrid network methods. They proposed a CNN-based AMR model, demonstrating superior efficiency and accuracy compared to traditional methods, which is critical in complex environments where traditional approaches fall short. Future research may focus on developing hybrid models like CLDNN, which integrates CNN and LSTM strengths for superior recognition performance (Wang *et al.*, 2022).

The maximum modulation value, known as deviation and measured in kilohertz (kHz), is determined by the design of the transmitter. Larger deviations create broadband systems, while smaller deviations result in narrowband systems. According to Haykin and Moher (2009), the modulated WBFM signal for a tone is given by Equation (1).

$$X_{\text{WBFM}}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_c J_n(\beta) \cos(w_c t + n w_m t) \quad (1)$$

where  $A_c$  is the amplitude,  $w_c$  is the carrier frequency,  $n$  is an integer,  $w_m$  is the frequency of the message, and  $J_n(\beta)$  is the Bessel's function of the first order, class  $n$ , and argument  $\beta$ . Thus, the results of the WBFM signal are obtained in the frequency domain by applying the Fourier transform shown in (1). According to Jangir *et al.* (2017), the frequency spectrum reveals that  $J_n(\beta)$  decays as  $n$  grows, and consequently, indicating that the majority of the signal's power is concentrated within a limited bandwidth.

The standard method for estimating the bandwidth (BW) of the WBFM signal is known as Carson's rule. According to this rule, approximately 98 % of the total signal energy is contained within the bandwidth, which is expressed in Equation (2).

$$BW = 2(\Delta F + W) \quad (2)$$

Where BW is the bandwidth of the WBFM signal,  $\Delta F$  is the maximum frequency deviation, and W is the message bandwidth. The maximum frequency deviation is given by Equation (3).

$$\Delta F = K_f |X(t)_{\max}| \quad (3)$$

Here,  $K_f$  is the sensitivity constant of the WBFM modulator ( $\frac{\text{Hz}}{\text{V}}$ ), and  $|X(t)_{\max}|$  represents the maximum amplitude of the message signal. The value of the sensitivity factor  $K_f$  for the GNU radio modulator block was evaluated by applying a continuous voltage to the input and measuring the frequency of the output signal in the WX GUI Scope Sink (Pei et al., 2018). These values were placed on a Cartesian diagram ( $X, Y$ ), and the corresponding slope was obtained.

$$K_f = 150 \frac{\text{kHz}}{\text{V}}$$

However, following Carson's rule, the bandwidth can also be calculated using Equation (4).

$$BW = 2 \left( \frac{K_f |X(t)_{\max}|}{W} + W \right) = 2(\beta + 1)W \quad (4)$$

Where  $\beta$  is the modulation index. From Equation (4), it can be inferred you can infer that: (i)  $BW \approx 2\beta W$  for  $\beta \gg 1$ , and (ii)  $BW \approx 2W$  for  $\beta \ll 1$ ; (iii) for intermediate values of  $\beta$ ,  $BW = 2(\beta+1)W$ . Depending on the modulation index, one can distinguish: WBFM for ( $\beta > 1$ ), and Narrowband Frequency Modulation (NBFM) for ( $\beta < 1$ ). WBFM is used for broadcasting with a message bandwidth of  $W = 15$  (kHz),  $\Delta F_{\max} = 75$  (kHz) and modulated signal bandwidth of  $BW = 180$  (kHz). On the contrary, NBFM is used for voice communications, with bandwidth  $W = 3$  (kHz),  $\Delta F_{\max} = 5$  (kHz) and modulated signal bandwidth of  $BW = 16$  (kHz).

The frequency deviation ( $\Delta F$ ) must be defined for any broadcasting system. Commercial FM stations, operating with the 88 MHz to 108 MHz range, use a deviation of  $\pm 75$  kHz. The audio system of the television broadcast, which also uses FM, operates with a maximum deviation of  $\pm 25$  kHz. Other FM systems with less demand, such as SCA (Subsidiary Communications Authorization) and narrowband systems use an  $\Delta F$  of  $\pm 15$  kHz in their transmissions.

The modulation index, for any message, can be described as shown in Equation (5).

$$\beta = \frac{\Delta F}{W} = \frac{K_f |X(t)_{\max}|}{W} \quad (5)$$

This parameter presents the WBFM phase deviation, *i.e.*, the maximum separation between  $\theta_i(t)$  and the  $2\pi f_c t$  angle of the carrier (Meshram & Kolhare, 2019). There is a direct relationship between the amplitude of the modulating signal with the frequency deviation in WBFM (Singh *et al.*, 2018).

To assess audio quality, several key parameters are commonly employed:

- i.* **The total harmonic distortion (TDH):** This parameter represents the ratio between the RM value of the fundamental signal and the square root of the sum its harmonics—generally limited to the first five, which are considered the most significant. TDH quantifies the differences between the signal introduced to the transmitter and the signal obtained at the output of the receiver. For example, distortion may occur at the modulator-transmitter output due to overlap between the fundamental frequency of the modulated carrier signal and its harmonics.
- ii.* **Energy level of the output signal:** This is typically measured using either peak power (Pp) for short periods or RMS (Root Square Mean) power for long periods.
- iii.* **Frequency response (RF):** This parameter measures the system's ability to accurately reproduce an input signal across the entire frequency spectrum.
- iv.* **Signal-to-Noise Ratio (SNR):** SNR is defined as the ratio between the RMS value of the fundamental signal and the square root of the sum of the squares of all the other spectral components, excluding harmonics and DC components. It quantifies the difference between the audio signal and the Johnson-Nyquist noise (*JNN*) introduced into the system. SNR is expressed in decibels (dB); higher values indicate better sound quality.

## Additional Integrations With SDR Technology

Nasser *et al.* (2021) provided a comprehensive review of spectrum sensing (SS) in cognitive radio (CR) networks, emphasizing the role of SS in 5G IoT applications. They explored the importance of half-duplex (HD) and full-duplex (FD) paradigms and proposed integrating machine learning to enhance SS performance. This integration is especially relevant for SDR systems due to the adaptability of software-defined technologies to improve frequency resource management (Nasser *et al.*, 2021).

In another study, Zhou *et al.* (2020) explored SDR-based repeater technology, employing GNU Radio for dynamic parameter configuration and real-time monitoring of repeater signals. Their findings demonstrated that an SDR-based repeater could extend the transmission range of portable stations and improve data transmission stability, illustrating the high scalability and reliability of SDR for enhancing both voice and data signals (Zhou *et al.*, 2020).



Further applications of SDR technology include the use of GNU Radio for both radar and indoor FM communication systems. [Harianto \*et al.\* \(2021\)](#) validated SDR radar systems for detecting ground objects and tested SDR-based FM communication at 100.3 MHz, achieving over 99 % accuracy in power measurement and SNR evaluation. This flexibility underscores the potential for SDR platforms to enhance signal processing in diverse communication environments ([Harianto \*et al.\*, 2021](#)).

## Advanced SDR Transceiver Design

[Gummineni and Polipalli \(2020\)](#) presented the implementation of a reconfigurable transceiver using SDR with HackRF One and GNU Radio, focusing on adapting signal processing techniques such as AM and FM modulation. Their system leverages the flexibility of GNU Radio for real-time spectrum analysis, making it suitable for various communication applications. This adaptable design reduces hardware dependency, enhancing the efficiency of modern wireless systems ([Gummineni & Polipalli, 2020](#)).

Lastly, [Duarte \*et al.\* \(2019\)](#) developed a millimeter-wave (mmWave) SDR communication system for future 5G applications at 60 GHz, featuring a custom-designed 1 Gbps transmission architecture using OFDM and advanced 256-QAM modulation. The SDR platform, based on FPGA and ADC/DAC integration, supports low-latency, high-speed wireless communication, demonstrating the effectiveness of SDR in high-frequency, high-data-rate applications critical for next-generation wireless systems ([Duarte \*et al.\*, 2019](#)).

## Methods

The implementation of the WBFM transmitter and receiver using HackRF One, serving as SDR hardware, involved the configuration of one module as the transmitter (see Figure 4) and another as the receiver (see Figure 5).

In an open field test, a chirp signal (frequency sweep of a tone between 20 Hz to 20 kHz), as illustrated in Figure 6, and a .WAV audio file were transmitted through a WBFM system using a carrier signal of 87.7 MHz. The receiver, positioned at a fixed distance of 50 m and tuned to the same frequency, successfully retrieved the message in the baseband.

Chirp signals are widely used in audio measurements to evaluate the behavior progression of a measured value (parameters of the audio quality indicated in Table 2) over a parameter in progress: frequency sweep. Unlike a stationary sinusoidal signal, a chirp exhibits frequency changes over time. This is due to its phase acceleration, resulting in a time-dependent fre-



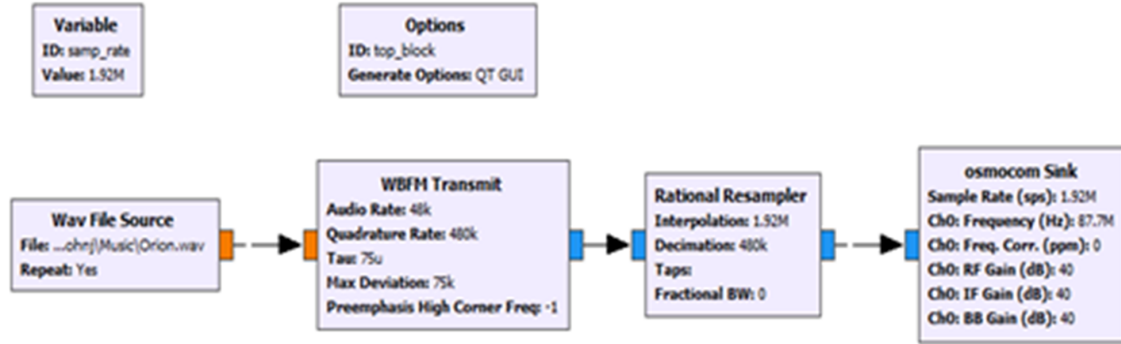


Figure 4. WBFM transmitter block diagram

Source: Software GNU radio.

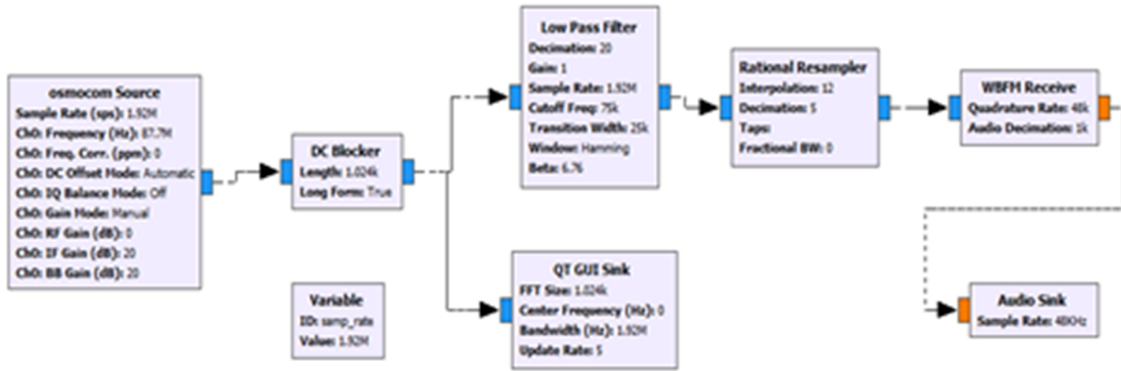
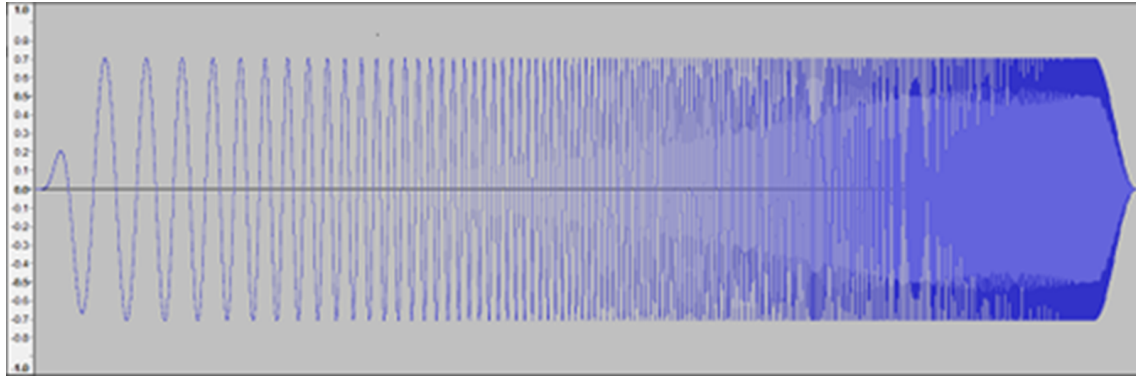


Figure 5. WBFM receiver block diagram

Source: Software GNU radio.

quency. A relatively simple mathematical model of a chirp is:  $y(x) = A(x) \cos(\varphi(x))$ , where  $A(x) \geq 0$  represents the amplitude and  $\varphi(x)$  the phase. In this study, a constant amplitude was considered, and the phase function was monotonic.

Two software were used to evaluate the specified chirp and audio parameters: the first was the free RMAA 6.1.4 Right Mark Audio Analyzer and the second was the SDR# spectrum analyzer. To assess the quality of the received signal, the input signal level was kept constant at  $V_P = 320$  mV, corresponding to 0 dBFS—the maximum digital level before clipping. Key parameters were configured as follows: a bandwidth of 15 kHz, an audio rate of 48 kbps, an interpolation of 1,92 MHz, 1,92 million samples per second (Msps), and the maximum frequency deviation in the WBFM transmission block was varied.



**Figure 6.** Chirp signal

**Source:** The authors.

**Table 2.** Reference values for SDR parameters

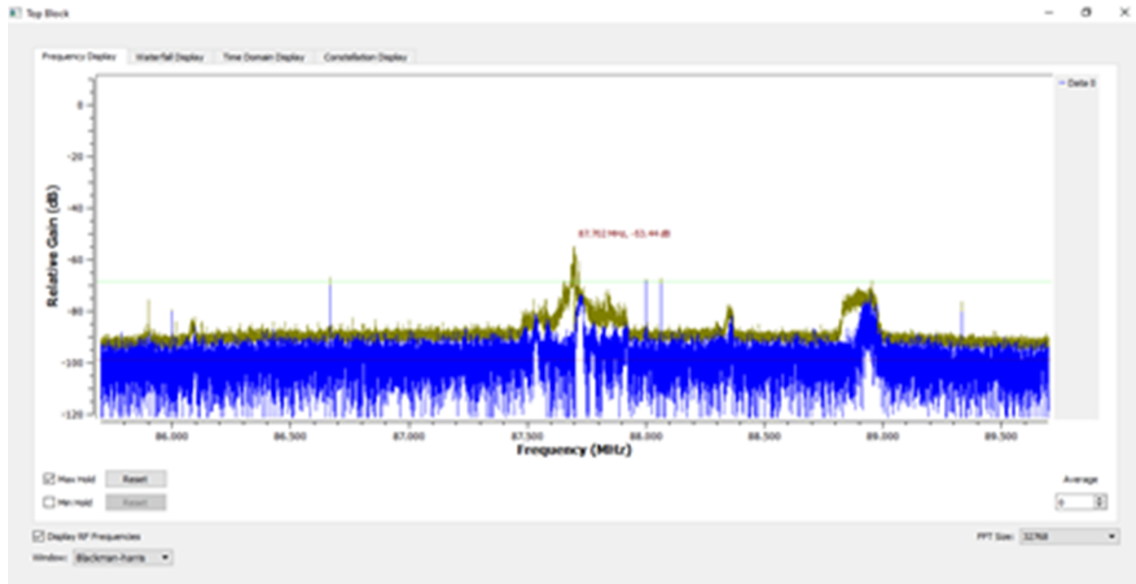
Parameters	Values of reference
TDH	1 %
Pp	3,0 dBFS, on the calibration value -18 dBFS or 0 dBu
RF	0,5 a 15 kHz
SNR	>40 (dB), FM strengthens the transmission of information versus-noise

The audio quality evaluation parameters and their reference values are shown in Table 2. Those are the values in which the "sweet"point occurs, and it does so when the signal is not strong enough to distort or distort. soft enough to blend in with floor noise.

## Results and Discussion

Figure 7 shows the chirp signals modulated on an RF carrier that was received in the SDR-HackRF One.

No noticeable variation in the carrier frequency deviation was observed when doing the tone frequency sweep (chirp signals) because the sweep affects the rate of change of the carrier frequency deviation, while the tone amplitude is directly proportional to the frequency deviation of the WBFM system. The maximum change in carrier frequency deviation occurred when  $\cos(\omega t) = 1$ , at which time the instantaneous frequency was  $\Delta F_{\text{máx.}} = f_c(1 \mp 1 \times A_m)$ .



**Figure 7.** WBFM reception in SDR

**Source:** SDR# spectrum analyzer output.

Table 3 shows the results obtained when transmitting a .WAV audio file. When the frequency deviation reached 60 kHz and modulation index exceeded 4, high-quality audio was observed. These findings support Armstrong's principle that increased FM bandwidth improves audio quality, even under low RF power levels. These results correspond to a 95 % confidence interval, in which the lower limit was 16.21 KHz and the upper limit was 58.79 KHz (16.21; 58.79). However, increased bandwidth also introduces more noise. For this reason, FM stereo sounds louder than FM mono.

As shown in Figure 8, increasing the frequency deviation to 75 kHz resulted in a SNR improvement to 39 dB, while the carrier power rose modestly from 1.1 to 2.7 dBFS. This demonstrates that increasing the frequency deviation improves the SNR. Exponential modulations, such as WBFM, differ in this regard from linear modulations, which are primarily affected by the transmitted signal's power.

## System Behavior Under Noise and Interference

To further explore system robustness, it would be valuable to test the WBFM system under varying noise and interference. Such tests could offer insights into how well the system maintains audio quality under adverse conditions. The presence of noise or interference would

**Table 3.** TDH, Pp, RF and SNR values obtained from the audio signal retrieved at the receiver when the frequency deviation in the transmitter is changed

$\Delta F$ (kHz)	Parameters			
	TDH (%)	Pp (dBFS)	RF (kHz)	SNR (dB)
5	35 @ 3 KHz	1,1	3	20
15	18 @ 5 KHz	1,3	5	26
30	12 @ 6 KHz	1,5	6	28
40	7 @ 8 KHz	1,7	8	30
60	4 @ 11 KHz	1,9	11	34,4
75	2 @ 13 KHz	2,7	13	39

Source: The authors.



**Figure 8.** WBFM reception for a 60 kHz frequency deviation

Source: SDR# spectrum analyzer output.

likely degrade signal fidelity and reduce SNR, making it more difficult to isolate the intended message. Additionally, increased THD may result from unwanted spectral components overlapping with the signal's harmonics.

Interference and noise could distort the modulated signal, reducing both its quality and signal-to-noise ratio (SNR), making it harder to distinguish the intended signal. Noise introduces additional components into the spectrum, blending with the primary harmonics and frequencies of the message, thereby increasing total harmonic distortion (THD) and reducing the fidelity of the received audio signal. Additionally, interference may alter the carrier's frequency deviation, especially if it introduces amplitude variations that affect the modulating signal.

High noise levels can also impair digital processing accuracy in the SDR, limiting its system's sensitivity to weak signals and reducing audio clarity. Future research should include controlled noise injections or external signal interference during experiments to quantify their impact on key parameters such as SNR and frequency deviation. The addition of filtering techniques or adaptive algorithms may mitigate these effects, maintaining system reliability in noisy environments.

## Challenges and Mitigation Strategies

Other factors that affect audio quality in a WBFM receiver with SDR-HackRF One include:

1. Low power of the received RF signals.
2. Distortion in the transmitter-channel-receiver chain.
3. Interference in the transmission channel.
4. The signal-to-noise ratio of the ADC, which impacts receiver sensitivity.

To minimize these issues, pre-filtering the signal before analog-to-digital conversion is recommended to prevent aliasing and improve sample rates in ADCs (to hundreds of MHz). However, sample rates also set limits on the receiver bandwidth and data transmission capacity.

Due to these limitations, additional hardware components such as filters, RF amplifiers, and frequency converters are crucial for improving performance.

## Distortion Analysis

Amplitude and phase distortions were observed in the chirp signals likely due to the non-linear behavior of the WBFM system. Total harmonic distortion (THD) occurs when the system introduces harmonics absent in the input signal, resulting from the non-linearities in the modulator, channel, and demodulator. For example, the modulated signal contains harmonics in  $W_c$ ,  $W_c \mp W_m$ ,  $W_c \mp nW_m$ , etc., with attenuation of higher-frequency components during the sweep. Phase distortion resulted in a delay in the received chirp, as because the propagation speed of the modulated signal in the channel varied with frequency: the speed tended to be higher near the center frequency and decreased at the ends of the channel. spectrum.

## Conclusions

This study presented a software option for being used in SDR devices capable of transmitting audio messages—including .WAV files and chirp signals. Information is modulated in WBFM with different frequency deviations. For transmission distances of 50 m, the sent signals are received correctly for a frequency deviation  $\geq 60$  KHz. This system shows potential for applications in education and channel estimation. In the future works are considering more digital encodings and modulations.

The evaluation of the quality of the received signals when modulated and transmitted in WBFM with different frequency deviations was successfully achieved thanks to the flexibility offered by the HackRF One (open source SDR hardware).

SDR applications with a personal computer display (SDR#) or mobile terminal (SDRoid) could prove useful for engineering students, particularly for conducting radio frequency practices and measuring transmitted or received signals, such as the COVID-19 pandemic, due to their user-friendly interface.

Finally, SDR technology provides flexibility to the software in radio modules, as it gives them the possibility to reprogram, remove, or add functionalities more easily compared to the technology built by physical modules. This feature makes it possible to modify the system at any time, without making major investments and without altering the hardware.

## Acknowledgments

The author gratefully acknowledges the support of the Colombian School of Engineering Julio Garavito for funding the study. Code PRY18, 2018-1.

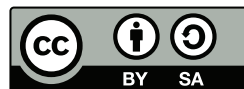
## References

- Akeela, R., & Dezfouli, B. (2018). Software-defined Radios: Architecture, state-of-the-art, and challenges. *Computer Communications*, 128, 106-125.
- Alam, O. B., & Rogers, A. E. E. (2015). Enhancing Low-Cost Ozone Spectrometers to Measure Mesospheric Winds and Tides. *arXiv*. Retrieved from: <https://arxiv.org/pdf/1508.00894v3.pdf>.
- Allahvirdi-Zadeh, A. (2021). Software Defined Radio (SDR) as a GNSS receiver in future CubeSats. 10.13140/RG.2.2.28290.20166
- Collaborators GNU Radio. (2021, 19 March). GNU Radio: Main Page [on-line]. Retrieved from: [https://wiki.gnuradio.org/index.php/Main\\_Page](https://wiki.gnuradio.org/index.php/Main_Page).
- Dharani, N. & Vaitheeswari, M. (2020). Design of SDR Transceiver in Industrial Automation, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) NCETESFT – 2020* (Volume 8 – Issue 14)
- Duarte, L., Gomes, R., Ribeiro, C., Caldeirinha, R.F.S. (2019). A Software-Defined Radio for Future Wireless Communication Systems at 60 GHz. *Electronics*, 8, 1490. <https://doi.org/10.3390/electronics8121490>
- Feng, S., Mughees, N., & Wollesen, V. (2020, September). Reviewing the application and integration of software-defined radios to radar systems. In *2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RadarConf2043947.2020.9266396>
- Gummineni, M., & Polipalli, T. R. (2020). Implementation of reconfigurable transceiver using GNU Radio and HackRF One. *Wireless Personal Communications*, 112, 889–905. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07080-0>
- Hapsari, J. P., & Ismail, M. (2021). Analisa unjuk kerja software defined radio (SDR) dengan teknik quadrature amplitude modulation (QAM). *Infotekmesin*, 12(2), 139–143. <https://doi.org/10.35970/infotekmesin.v12i2.726>
- Hariato, B. B., et al. (2021). Design indoor FM communication based on SDR and GNU Radio using validated spectrum analyzer. *Journal of Physics: Conference Series*, 1845(1), 012078. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1845/1/012078>
- Haykin, S., & Moher, M. (2009). *Communication systems* (5th ed.). John Wiley & Sons.
- Hsieh, J. W., Tsai, G. R., & Lin, M. C. (2003, December). Using FPGA to implement an n-channel arbitrary waveform generator with various add-on functions. In *Proceedings of the 2003*

- IEEE International Conference on Field-Programmable Technology (FPT)* (pp. 296–298). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FPT.2003.1275761>
- Jangir, B. K., Kumawat, V., Khatun, H., & Sinha, A. K. (2017, April). Computationally improved algorithm to find higher roots of integer order Bessel function in Gyrotron application. In *2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)* (pp. 910–914). IEEE. <https://doi.org/10.1109/I2CT.2017.8226261>
- Jovanović, P., Petrović, P., Pavić, B., & Remenski, N. (2011). Implementation of RF signal generator for demodulator/receiver testing in SDR design. In *2011 19th Telecommunications Forum (TELFOR)* (pp. 282–284). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2011.6143545>
- Krishnan, R., Babu, R. G., Kaviya, S., Kumar, N. P., Rahul, C., & Raman, S. S. (2017, September). Software-defined radio (SDR) foundations, technology trade-offs: A survey. In *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)* (pp. 2677–2682). <https://doi.org/10.1109/ICPCSI.2017.8392204>
- Leech, M. (2012). A 21 cm radio telescope for the cost-conscious. *Canadian Centre for Experimental Radio Astronomy* <https://www.ccera.ca/papers/a-21cm-radio-telescope-for-the-cost-conscious/>
- Mejías, C., De Castro, J., & Henriquez, K. (2015). Desarrollo de un generador vectorial de onda arbitraria basado en radio definida por software y software libre. [Trabajo Especial de Grado, Universidad de Carabobo], Venezuela.
- Meshram, S., & Kolhare, N. (2019, November). The advent of software-defined radio: FM receiver with RTL-SDR and GNU Radio. In *2019 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)* (pp. 230–235). <https://doi.org/10.1109/ICSSIT46314.2019.8987588>
- Mishra, M., Potnis, A., Dwivedy, P., & Meena, S. K. (2017, October). Software-defined radio-based receivers using RTL-SDR: A review. In *2017 International Conference on Recent Innovations in Signal Processing and Embedded Systems (RISE)* (pp. 62–65). <https://doi.org/10.1109/RISE.2017.8378125>
- Narayana, P. S., Kumar, M. S., Kishan, A. K., & Suraj, K. V. R. K. (2018). Design approach for wideband FM receiver using RTL-SDR and Raspberry Pi. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2.31), 9–12. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.31.13386>
- Nasser, A., Al Haj Hassan, H., Abou Chaaya, J., Mansour, A., & Yao, K.-C. (2021). Spectrum sensing for cognitive radio: Recent advances and future challenges. *Sensors*, 21(7), 2408. <https://doi.org/10.3390/s21072408>






- Natarajan, T., & Devi Kh, C. (2017). A review on recent trends in software-defined radio design and applications. *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE)*, 6, 1021–1025.
- Pei, Y., Chen, H., & Pei, B. (2018, July). Implementation of GPS software receiver based on GNU Radio. In *2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)* (pp. 1–3). <https://doi.org/10.1109/CSQRWC.2018.8455475>
- Rischke, J., & Salah, H. (2020). Software-defined networks. In *Computing in Communication Networks* (pp. 107–118). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820488-7.00018-9>
- Shaik, P., Singya, P. K., & Bhatia, V. (2019). Performance analysis of QAM schemes for non-regenerative cooperative MIMO network with transmit antenna selection. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 107. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.05.012>
- Singh, K., Biswas, S., Ratnarajah, T., & Khan, F. A. (2018). Transceiver design and power allocation for full-duplex MIMO communication systems with spectrum sharing radar. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 4(3), 556–566. <https://doi.org/10.1109/TCCN.2018.2830758>
- Tang, W., Zheng, M., Yan Dai, Y., Zeng, Y., Zhao, X., Jin, Z., Chen, Q., Jun Cui, T. (2020). Wireless communications with programmable metasurface: New paradigms, opportunities, and challenges on transceiver design. *IEEE Wireless Communications*, 27(2), 180–187. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900308>
- Wang, T., Yang, G., Chen, P., Xu, Z., Jiang, M., & Ye, Q. (2022). A survey of applications of deep learning in radio signal modulation recognition. *Applied Sciences*, 12(23), 12052. <https://doi.org/10.3390/app122312052>
- Zhou, K., Deng, L., & Zhang, J. (2020). Research on repeater technology based on software-defined radio. In *2020 International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE)* (pp. 118–122). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CISCE50729.2020.00030>



## Blocks size effect on the shear strength of bimsoils with low volumetric blocks proportion

### Efecto del tamaño de bloques en la resistencia al corte de suelos con bloques (bimsoils) de bajas proporciones volumétricas

Campos-Muñoz., D.D. <sup>1</sup>, Ramos-Cañón., A.M. <sup>2</sup>, and Prada-Sarmiento., L.F. <sup>3</sup>

Fecha de Recepción: 30 de enero de 2023

Fecha de Aceptación: 1 de septiembre de 2024

**Cómo citar:** Campos-Muñoz., D.D., Ramos-Cañón., A.M. y Prada-Sarmiento., L.F. (2024). Blocks size effect on the shear strength of bimsoils with low volumetric blocks proportion. *Tecnura*, 28(81), 30-53. <https://doi.org/10.14483/22487638.20418>

## Abstract

The term bimsoils is used to define the inclusion of rigid blocks embedded in a weak soil matrix, where the stiffness ratio between both materials is greater than two. Research on bimsoils primarily focuses on determining shear strength parameters based on the volumetric proportion of blocks ( $VBP$ ). However, the shear strength of bimsoils is also influenced by other variables, including the size of the blocks. Although some authors indicate that size has no influence on shear strength, others conclude that strength is greater when the size distribution is well-graded, and the maximum block size is greater. This study analyses the influence of block size and  $VBP$  on bimsoils strength parameters, from drained triaxial tests modeled in ABAQUS. The block size is unique in the entire specimen and corresponds to a fraction of the diameter of the sample ( $D$ ) that varies from 0.1 to 0.2. Shear strength is higher for bimsoils with higher  $VBP$  and block size between  $0.12D$  and  $0.15D$  and it is reflected in the strength parameters. The influence of size occurs for different  $VBP$  and when the blocks have a uniform and columnar location. The increment in the  $VBP$  generates the increase in the anisotropy of the magnitude of the principal stresses in the sample and the block sizes  $0.12D$  and  $0.15D$  generate a greater heterogeneity of the shear stresses reflected in the magnitude and propagation of the stresses in the sample.

**Keywords:** bimsoils, blocks size, drained triaxial test, FEM, volumetric blocks proportion

<sup>1</sup>Magister en ingeniería civil de la Pontificia Universidad Javeriana .

Email: [dianet912@gmail.com](mailto:dianet912@gmail.com)

<sup>2</sup>Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia .

Email: [amramosc@unal.edu.co](mailto:amramosc@unal.edu.co)

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Civil and Architectural Engineering, Aarhus University, Denmark .

Email: [felipe.prada@cae.au.dk](mailto:felipe.prada@cae.au.dk)

## Resumen

El término bimsoils se utiliza para definir la inclusión de bloques rígidos embebidos en una matriz de suelo débil, donde la relación de rigidez entre ambos materiales es mayor a dos. La investigación en bimsoils se concentra en la determinación de los parámetros de resistencia en función de la proporción volumétrica de bloques (VBP). Sin embargo, la resistencia de bimsoils depende de otras variables, entre ellas el tamaño de los bloques. Aunque algunos autores indican que este no influencia la resistencia, otros concluyen que la resistencia es mayor cuando la distribución de tamaños es bien gradada y el tamaño máximo del bloque es mayor. Este estudio presenta un análisis numérico de la influencia del tamaño del bloque y la VBP en los parámetros de resistencia de bimsoils, a partir de ensayos triaxiales drenados modelados en FEM. El tamaño de bloque es constante en todo el espécimen y corresponde a una fracción del diámetro de la muestra ( $D$ ) que varía de 0.1 a 0.2. Se observa una mayor resistencia al corte en los bimsoils con valores elevados de VBP y tamaño de bloques entre  $0.12D$  y  $0.15D$ . Esto se refleja en los parámetros de resistencia. La influencia del tamaño se observa para distintas VBP y cuando los bloques tienen una distribución espacial uniforme y columnar. El aumento de la VBP genera el incremento en la anisotropía de la magnitud de los esfuerzos principales en la muestra y los tamaños de bloques  $0.12D$  y  $0.15D$  generan una mayor heterogeneidad de los esfuerzos de corte reflejado en la magnitud y propagación de los esfuerzos en la muestra.

**Palabras clave:** bimsoils, tamaño de bloques, ensayo triaxial drenado, elementos finitos, proporción volumétrica de bloques

---

## Introduction

Medley (1994) suggested using the term “bimrock”, coined by Raymond (1984) and derived from the geological concept of blocks within a rocky matrix or mixtures of rocks made up of rigid blocks within a fine matrix, to describe mixtures of relatively large, geotechnically significant competent blocks within a bonded matrix of finer and weaker textures. These mixtures exhibit a mechanical contrast between blocks and matrix, where the geometry and proportion of the blocks influence the mass properties of the rock at the scales of engineering interest) (Medley and Zekkos, 2011). Examples of bimrocks include thick pyroclastic rocks, melanges (rock masses composed of competent rock blocks of various sizes embedded in a weak clay matrix), fractured breccia and streamers, faulty rocks, and weathered and highly tectonized rocks Lindquist and Goodman (1994); Medley (2004); Medley and Goodman (1994). Kalender *et al.* (2014) introduced the term ‘bimsoil’ to describe complex mixtures that include rock blocks surrounded by a soil matrix, a condition similar to colluviums and erratic glacial deposits.

Research on bimrocks and bimsoils can be grouped into three main topics: in situ characterization, the uncertainty of the volumetric proportion blocks (Medley, 2002a; Ramos-Cañón *et al.*, 2020), and shear strength-stiffness properties. The aforementioned topics are interconnected, as the geotechnical properties depend on the distribution and geological characteristics of these in situ mixtures.

The strength and deformation properties of bimrocks / bimsoils depend on the Volumetric Block Proportion (*VBP*). In bimrocks with very weak block-matrix contacts, an increase in *VBP* generally results in a linear increase in the friction angle and an exponential decrease in cohesion (Lindquist and Goodman, 1994; Sonmez *et al.*, 2006). For volumetric proportions between 20 % and 25 %, it is observed that the cohesion decreases drastically, and the block-matrix interaction controls the strength. After 25 %, the shear strength is characterized by negligible cohesion (Coli *et al.*, 2011) and the interlocking of blocks predominates, forming more tortuous failure mechanisms (Kahraman and Alber, 2006; Kahraman *et al.*, 2008, 2010). For lower values of *VBP*, the change in shear strength mainly consists of the contribution of the mobilized friction angle and the loss of cohesion.

Regarding in-situ characterization, it has been concluded that the sampling scale of material mixtures can be defined based on a characteristic dimension (Medley and Lindquist, 1995; Medley and Zekkos, 2011). Medley and Lindquist (1995); Medley and Zekkos (2011) conducted an analysis of the block size distributions on maps and aerial photographs of San Francisco melanges, normalized with respect to a characteristic dimension ( $L_c$ ). In that case, it corresponded to the square root of the mapped area. The characteristic dimension can be any engineering measure, such as the width of a foundation, the height of a slope, or the diameter of a laboratory sample ( $D$ ) and the distribution of the sizes of a bimrock must range between  $0.05 L_c$  and  $0.75 L_c$  (Medley and Lindquist, 1995). The scalability of the bimrocks sampling supports the assertion that laboratory samples can serve as representative models of in-situ masses because they are independent of the scale of interest.

On the other hand, the contribution of the *VBP* on the bimsoils strength is reflected mainly in the increase in the mobilized friction angle defined as the sum of the critical friction ( $\varphi_c$ ) and dilation components ( $\psi$ ) (Gong and Liu, 2015; Holtz, 1960; Irfan and Tang, 1993; Patwardhan *et al.*, 1970). Irfan and Tang (1993) concluded that *VBP* does not have a well-defined influence on cohesion, while Miller and Sowers (1958) noted that cohesion increases for low *VBP* (higher proportion of matrix) due to the generation of compaction areas in the matrix located between blocks.

Research on the size of blocks in bimrocks primarily focuses on in-site characterization Coli *et al.* (2009); Medley (2002b); Medley and Zekkos (2011). In-situ characterization aims to estimate the distribution of block sizes in melanges and mixtures of shales and silt through photographic analysis. Medley and Zekkos (2011) indicated that the sizes of the blocks follow a potential distribution, with the exponent corresponding to the fractal dimension obtained from the analysis of various photographs.

Most of the experimental studies have focused on the influence of  $VBP$ , block distribution, and orientation on the shear strength of bimsoils. A variety of test methods have been employed, including in-situ tests (Chu *et al.*, 1996; Coli *et al.*, 2011; Gao *et al.*, 2021; Liang *et al.*, 2023; Wen-Jie *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2016b), small- and large-scale monotonic triaxial tests (Chu *et al.*, 2010; Jin *et al.*, 2017; Lindquist and Goodman, 1994; Wang *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2016a), cyclic triaxial tests (Cao *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2021), monotonic direct shear tests (Avşar, 2021; Cen *et al.*, 2017; Hu *et al.*, 2024), and cyclic torsional simple shear tests (Ishikawa and Miura, 2015). Note that uniaxial compression tests (Afifipour and Moarefvand, 2014; Avşar, 2020; Mahdevvari and Moarefvand, 2018) were only performed for bimrocks (welded materials), as additional cementing agents were required.

Numerical and experimental research on the specific influence of block size on bimsoils is limited. Holtz and Gibbs (1956) concluded that the size of the blocks does not influence the shear strength of the gravel and sand mixtures, while Donaghe and Torrey (1979); Rathee (1981) indicated that the shear strength of bimsoils with well-graded size distributions is higher when the maximum size of the blocks is large. For bimsoils with a predominantly granular matrix, the increase in shear strength is reflected in the friction angle, so the increase in the maximum block size generates an increase in the mobilized friction angle (Rathee, 1981). Sheikhpourkhani *et al.* (2024) produced DEM modeling results showing that an increase in volumetric block proportion ( $VBP$ ) reduces uniaxial compressive strength ( $UCS$ ) and cohesion, but increases the internal friction angle due to the occlusion effect of the blocks. The study highlights that block-matrix contacts dominate the failure mechanism up to a  $VBP$  of 40 %, while block-block contacts become more significant at higher  $VBP$  values. Sharafisafa *et al.* (2024) numerically investigated the impact of the strain rate on the failure mechanisms of bimrocks with varying volumetric block proportions ( $VBP$ ). Different strain rates were applied to specimens with  $VBP$ s between 25 % to 90 %. Results revealed that strain rate significantly affects failure patterns, peak stress, and post-peak behavior. At low to medium strain rates ( $\leq 0.18/s$ ), failure patterns are consistent, while higher rates induce complex failure modes such as multiple fracturing and axial splitting, with a rapid peak stress increase. Bimrocks with  $VBP$ s up to 75 % exhibit similar strain rate sensitivity, whereas specimens with 90 %  $VBP$  show minimal variation in failure type (primarily axial splitting) and peak stress.

Due to the discrepancies in prior interpretations and limited investigations regarding the effect of block size on bimsoil strength, this study focuses on examining the influence of block size at low  $VBP$  on the variation of the cohesion and friction angle. Notably, the variation of the cohesion is associated with the generation of compaction areas at low  $VBP$ s.

The influence of spherical block size on the shear strength parameters of bimsoils with low ( $VBP < 30\%$ ) is quantified by means of finite element models. To isolate the effects of block size and  $VBP$ , 3D models of triaxial tests with different  $VBP$  were performed in the finite element software ABAQUS using the Mohr-Coulomb constitutive model, for cylindrical specimens with 10 cm in diameter and 10 cm in height (1:1 ratio), where the blocks are spherical. The size of blocks does not change in a specimen, and the random spatial location follows a uniform distribution.

The results indicate that the strength parameters increase with both increment of  $VBP$  and with block size up to a range corresponding to 12 % and 15 % of the diameter of the sample ( $D$ ) and then it decreases to the same value that was obtained with the smallest size (10 %  $D$ ). The soils with  $0.12D$  and  $0.15D$  blocks show a greater magnitude and distribution of the shear stresses in the entire sample.

## Materials properties (blocks and matrix)

Bimsoil are made up of rigid blocks and a weak soil matrix, so the definition of the properties is presented for each component separately.

### Blocks

The properties of a granitic rock are used to characterize the rigid spherical blocks. A linear elastic constitutive model was selected, as no plastic deformation is expected under the stress conditions applied to the bimsoil sample in the numerical simulations. The model parameters for the blocks were obtained considering the properties of the granite. [Zhang \(2016\)](#) presents that the modulus of elasticity ( $E$ ) and the Poisson ratio ( $\nu$ ) of granite vary between 6 - 100 GPa and 0.09 - 0.39, respectively. For the ABAQUS model, the elastic parameters  $E = 52$  GPa and  $\nu = 0.19$  were selected.

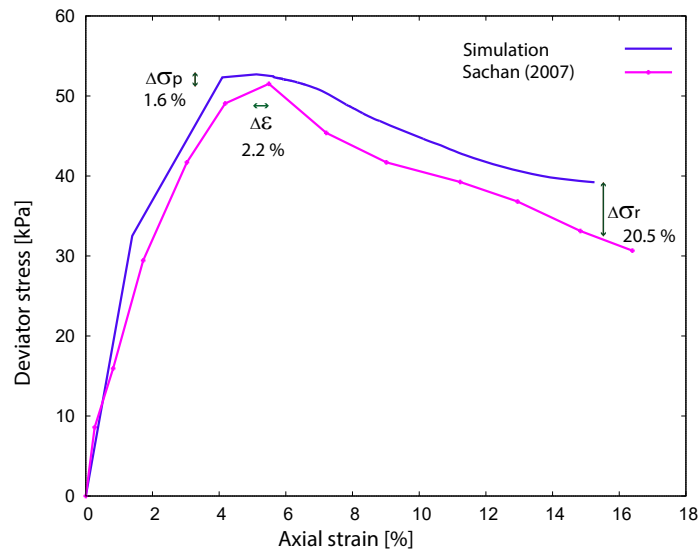
### Matrix

The weak matrix is represented by a light overconsolidated soft clay, modeled using the Mohr-Coulomb constitutive model available in ABAQUS. An element test simulation based on the finite element model with one element was generated to reproduce the softening behavior expected for lightly overconsolidated clay soils. This simulation replicated the triaxial test conditions with volumetric change. The parameters were calibrated until a good match was obtained with experimental results of overconsolidated kaolin reported by [Sachan and Penu-madu \(2007\)](#).

The Mohr-Coulomb constitutive model available in ABAQUS requires defining the following parameters: elasticity modulus ( $E$ ), the Poisson ratio ( $\nu$ ), friction angle ( $\varphi$ ), dilation angle ( $\psi$ ), cohesion ( $c$ ), and the equivalent plastic deformation ( $\varepsilon_{eq}^p$ ). The parameter  $\varepsilon_{eq}^p$  is very sensitive and ,together with the cohesion, controls the softening shape for the stress-strain curve. The values presented in Table 1 were determined through calibration using the experimental data reported by [Sachan and Penumadu \(2007\)](#). Figure 1 shows the simulation of the element test and the laboratory deviatoric stress ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) vs axial strain ( $\varepsilon_1$ ). The relative differences in peak stress ( $\Delta\sigma_p$ ), strain at peak stress ( $\Delta\varepsilon$ ) and residual stress ( $\Delta\sigma_r$ ) are small.

**Tabla 1.** Parameters used for kaolin ([Sachan and Penumadu, 2007](#)) and clay matrix

Parameter	Kaolin ( <a href="#">Sachan and Penumadu, 2007</a> )	Clayey matrix
$E$	2500 kPa	10000 kPa
$\nu$	0.32	0.32
$\varphi$	12°	12°
$\psi$	0.1°	3°
$c$	18 kPa - 18 kPa - 6 kPa	30 kPa - 30 kPa - 10 kPa
$\varepsilon_{eq}^p$	0 - 0.15 - 0.6	0 - 0.15 - 0.6



**Figura 1.** Differences of the deviator stress - axial strain curves of the simulation and kaolin reported by ([Sachan and Penumadu, 2007](#))



## Numerical model

A 3D finite element model of a cylindrical specimen subjected to confining stresses of 75 kPa, 150 kPa, and 300 kPa was created in ABAQUS. A controlled vertical displacement equivalent to an axial deformation of 20 % was subsequently prescribed. Given that the mechanical behavior of a bimsoil depends on numerous variables—and the aim of this study is to investigate the influence of the size of the blocks and the *VBP* on the shear strength—the problem was specified as follows:

- The cylindrical sample has a diameter and height of 10 cm (1:1 ratio), ensuring that the geometry does not favor any particular direction for block distribution. This prevents the specimen's shape from influencing the test response with a variable deformation-stress behavior due to the heterogeneity of the soil ([Lade and Wasif, 1988](#)).
- The blocks are spherical in shape and randomly distributed within the sample following a uniform distribution.
- The *VBP* is low (15 %, 20 % and 25 %) and represents the zone in which bimsoils reflect an exponential decrease in cohesion ([Sonmez et al., 2006](#)). This reduction is attributed to an increase in soft compaction areas between the blocks ([Miller and Sowers, 1958](#)).
- Block sizes range from 0.05  $D$  to 0.75  $D$ , where  $D$  represents the characteristic dimension—specifically, the diameter of the cylindrical specimen ([Medley and Lindquist, 1995](#)). Five block sizes (10 mm, 12 mm, 15 mm, 18 mm and 20 mm) were defined with a mono-disperse distribution in the entire sample and are represented as a fraction of the diameter of the sample ( $D$ ).
- Blocks and surrounding matrix are linked together and cannot move independently from each other.
- A triaxial test model with volume change was simulated using ABAQUS. The boundary conditions of a triaxial specimen were reproduced with the placement of two rigid steel plates, in the upper and lower area of the sample representing the triaxial cap and pedestal. The lower plate remains fixed and the upper plate is subjected to a vertical displacement of 2 cm corresponding to 20 % axial strain calculated with the initial height of the specimen.

The numerical model is generated from the definition of the geometry, loads, contour, and mesh conditions. The geometry consists of independently generating the blocks and the clay matrix to later assemble it in finite element software. Loads and boundary conditions obey the imposition of the confining stress and then, the vertical displacement of 20 mm was applied.



## Geometry

A procedure was implemented in MATLAB to randomly generate the coordinates  $x$ ,  $y$ , and  $z$  of the center of each block. These coordinates were required to follow a uniform distribution function throughout the sample. The ratio of the volume of all the spheres and the volume of the sample corresponds to the defined  $VBP$ . The spheres must be fully embedded in the sample and cannot overlap each other. Since the characteristic dimension in the finite element model corresponds to the diameter of the sample ( $D$ ), the block sizes are represented as a fraction of the diameter. Thus, 10 mm diameter blocks correspond to  $0.1D$ .

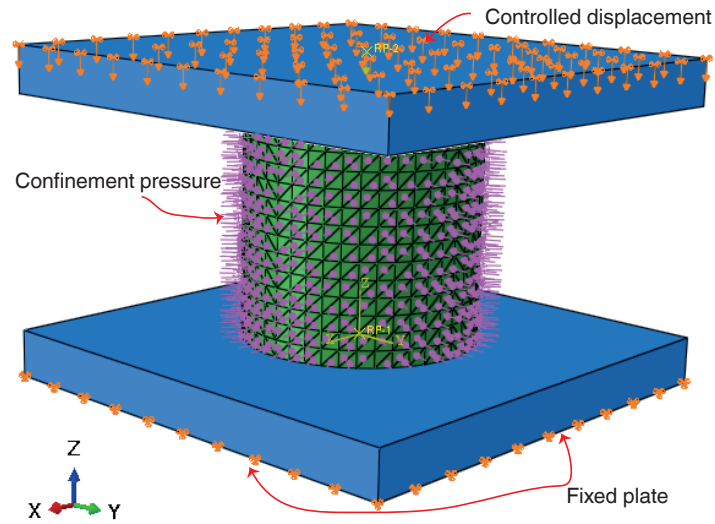
## Loads and boundary conditions

To simulate the conditions of a drained triaxial test, the model includes an upper and a lower plate of the sample, defined as rigid bodies. The plates interact with the sample using ABAQUS contact elements `surface-surface`, a type restriction `penalty` and with a Coulomb isotropic friction model. The parameter of this contact model is the coefficient of friction between surfaces ( $\mu$ ), which was defined as 0.15 for the contact of a cohesive material and steel. This coefficient relates the tangential stress to contact pressure. Slip occurs if during the simulation the equivalent tangential stress (magnitude of all tangential stresses) exceeds the critical stress (defined by  $\mu$ ) (Hibbitt *et al.*, 2001).

The loads and boundary conditions were defined in three sequential steps. First, an initial stage involved the imposition of the contact model, during which both the upper and lower plates remained fixed. Second, a confinement stage was implemented by applying pressure around the specimen and at a reference point located at the center of the upper plate, aligned with the axis of the sample. Finally, a shear stage was executed through controlled vertical displacement of the upper plate, reaching 20 % axial strain relative to the initial height of the specimen. Figure 2 shows the ABAQUS model, with all the imposed loads and boundary conditions.

## Mesh

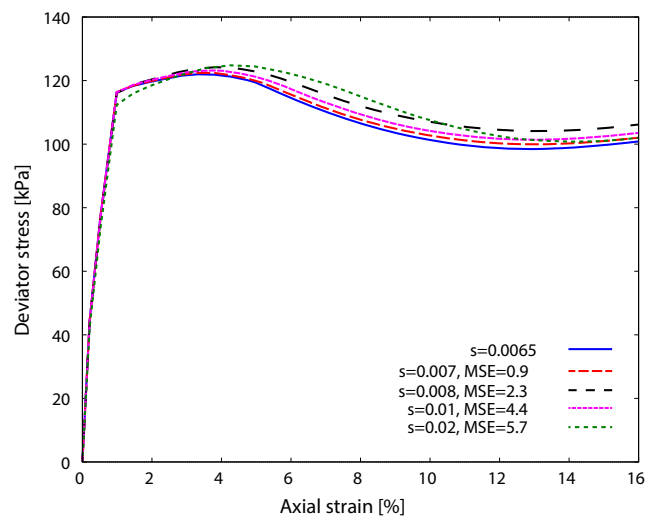
The model meshing is important because numerical results depend on the element type and refinement of the mesh. Given the cylindrical and spherical features of the model geometry, a free meshing technique is employed, as recommended in ABAQUS. This technique uses tetrahedral elements with linear approximation (C3D4). The choice of linear elements was motivated by computational efficiency: linear approximation significantly reduces processing time compared to a quadratic approximation. Considering the total number of models generated is 45 (3  $VBP$ , 5 block sizes and 3 confining pressures); the linear approximation was



**Figura 2.** Loads and boundary conditions in the sample

deemed optimal for reducing computational cost.

Mesh refinement was achieved through the use of partitions in the geometry, conditions in the number of nodes located at the edges of the geometry (seeds), and the definition of the edge distance of element ( $s$ ). A series of tests were carried out with different values of  $s$  until a value of  $s = 0.007$  was selected, which is the maximum value that the edges of the element can take so that the results of deformation stress curves present the least mean square error ( $MSE$ ) as can be seen in Figure 3.



**Figura 3.** Strain-stress curves for matrix samples with confinement of 150 kPa and different values of edge distance of element parameter  $s$

**Tabla 2.** Mesh verification criteria (Hibbitt *et al.*, 2001)

Criteria	Value for tetrahedron
Form factor	0.0001
Minimum angle	5°
Maximum angle	170°
Aspect ratio	10
Geometric deviation factor	0.2

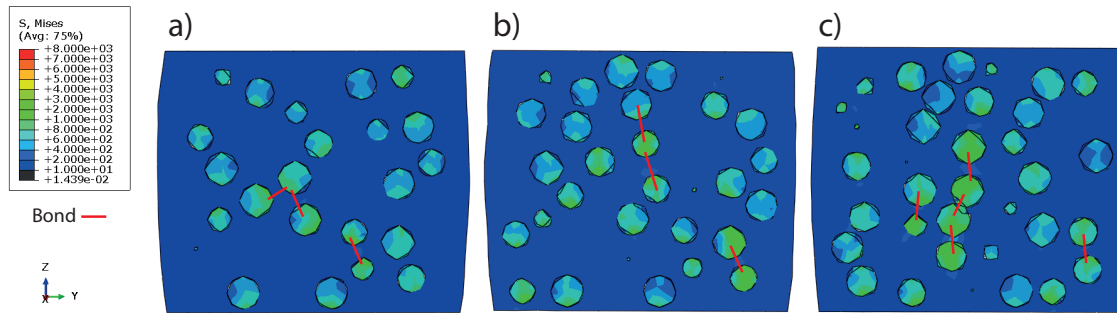
The meshes for the matrix and blocks were generated separately. Material properties were assigned to the elements of each mesh and then joined to form an assembly in ABAQUS. In this model, mesh-based fixed bonding implies that any movement imposed on a block results in a corresponding movement of the surrounding clay matrix, without separation—thus representing a welded condition.

In addition, the mesh verification was performed to assess the quality of the generated elements. This process involved evaluating the form factor, the maximum and minimum angles between nodes, the aspect ratio, and the geometric deviation factor of the elements comprising the model. Table 2 shows the limits of each of the verification measures mentioned. The statistics of the models show that only the bimsoil with *VBP* of 15 % and block size 10 mm had a tiny fraction of 0.00557 % of elements that do not comply with what is specified in the Table 2.

## Effect of *VBP* on the shear strength of bimsoil

The 45 numerical triaxial tests with volume change (5 block sizes and 3 *VBP*), simulated in this work under the conditions indicated in the previous section, demonstrate that shear strength interpreted with the Mohr-Coulomb strength criterion increases with the *VBP*. This is reflected in both the mobilized friction angle and cohesion. One way to visualize this trend is through the distribution of shear stresses, represented in ABAQUS by the von Mises stress invariant, developed in the sample, where the most rigid component (the blocks) has a higher stress concentration than the weak matrix. Figure 4 shows that at the same level of axial strain (10 %), when the *VBP* increases, there are larger shear stresses that create “bridges” between the blocks, considering that the location of the blocks is uniform throughout the sample. These transmissions of shear stresses are represented with red links in Figure 4, and it is evident that the higher *VBP*, the more linked blocks.

Plots of deviator stress ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) versus axial strain ( $\varepsilon_1$ ) for all bimsoils show a hardening behavior. From 3 % of axial strain onward, a noticeable difference emerges between the strength

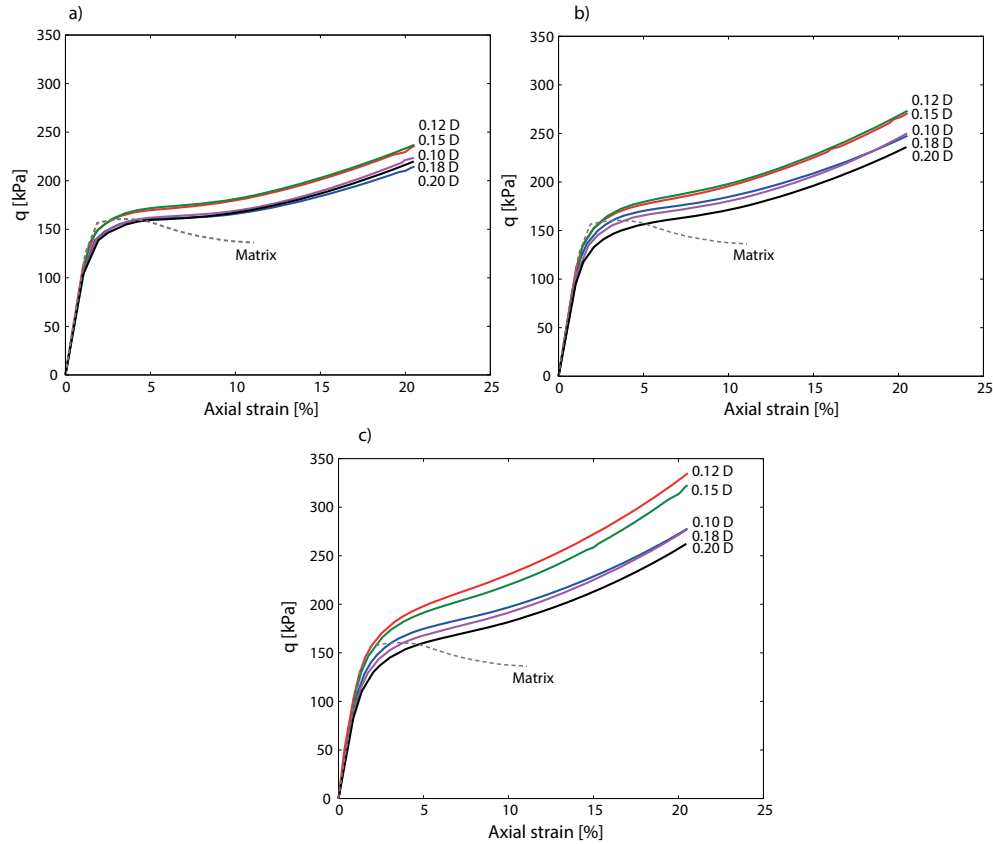


**Figure 4.** Von Mises stress distribution at 10 % deformation in bimsoils samples for a block size of 0.12  $D$  and  $VBP$  of a) 15 %, b) 20 % and c) 25 %

of bimsoil samples and that of samples composed of solely matrix material (see Figure 5) for different  $VBP$ . The strain hardening behavior resembles the mechanical response of a colluvial deposit that, as it slides, resists more until it mobilizes all its strength and stops (Irfan and Tang, 1993). On the other hand, Barton (2013) argues that the shear strength of a saprolite presents hardening in the zone of influence of clay, followed by a significant strength increase in the zone of influence of the blocks (high deformations).

At the onset of the shear ( $\varepsilon = 0\%$ ), the direction of principal stress, obtained from the nodes of the entire specimen, presents a uniform distribution of frequencies quantified with a K-S test at 95 % reliability, and it was found that after 3 % axial deformation, anisotropy begins to appear in the directions of the principal stresses. The anisotropy of the directions of the principal stresses of the sample, determined according to the nomenclature of the continuum mechanics (tension positive, compression negative), begins at 3 % axial deformation at which strength differences first appear between the specimens with only matrix and the specimens with blocks. The anisotropy of the principal stress directions is presented in Figure 6, which shows the accumulated frequencies of the angles formed between the minor principal stress ( $\sigma_3$ ) and the direction of application of the controlled displacement (axis  $z$ ) across all the nodes of the sample. As axial deformation increases, the anisotropy in stress direction progressively vanishes, regardless of block size or  $VBP$ . This trend was observed in all the tested bimsoils triaxial specimens.

On the other hand, the ratio of intermediate principal stresses ( $b$ ), defined by Eq. 1 (see Figure 7). When  $b$  is close to 1, there is an orthotropic stress state, as observed in the matrix case. As  $b$  decreases, the stress state is more anisotropic, as with bimsoils. The values of  $b$  are obtained from the principal stresses of the nodes of the entire sample at a deformation level of 10 % and are grouped to define their distribution. The accumulated frequencies of  $b$  for the



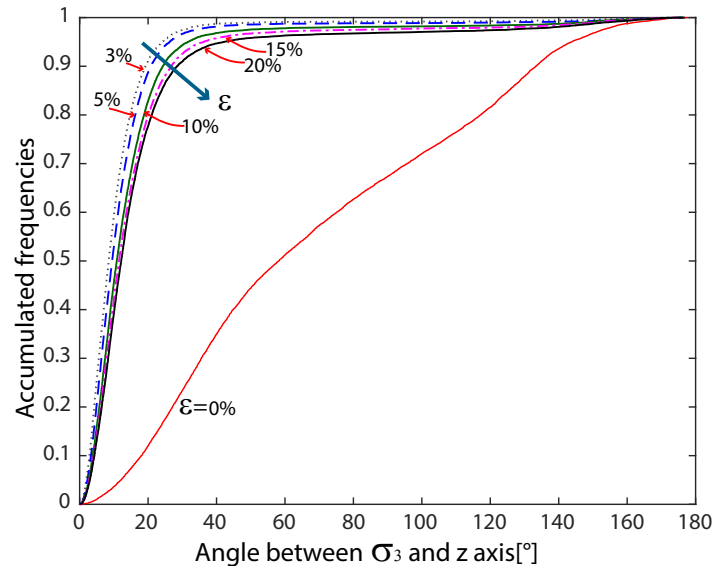
**Figure 5.** Deviator stress - axial strain curves for *VBP* of a) 15 %, b) 20 % and c) 25 %.

matrix and bimsoils indicate that a *VBP* of 25 % corresponds to a median of 0.73, while a *VBP* of 15 % has a median of 0.79. These results confirm that higher *VBP* levels induce greater anisotropy in the magnitude of the main stresses within the samples.

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (1)$$

Since the simulated bimsoil exhibits strain-hardening behavior, the Lambe (MIT) triaxial stress invariants  $s'$  (centre of Mohr's circle) and  $t$  (radius of Mohr's circle) were calculated at different deformation levels to obtain the mobilized friction angle and cohesion. Results indicate that cohesion tends to decrease while the mobilized friction angle increases with axial strain, regardless of *VBP* and block size (see Figure 8).

For bimsoils with low *VBP*, the increase in the friction angle is primarily attributed to the volumetric dilation—i.e., the increase in volumetric strain relative to axial strain—since in these cases, no significant friction or contact between blocks was observed. In contrast, when the *VBP* is greater than 25 %, the behavior of bimsoils is dominated by friction and dilation, while



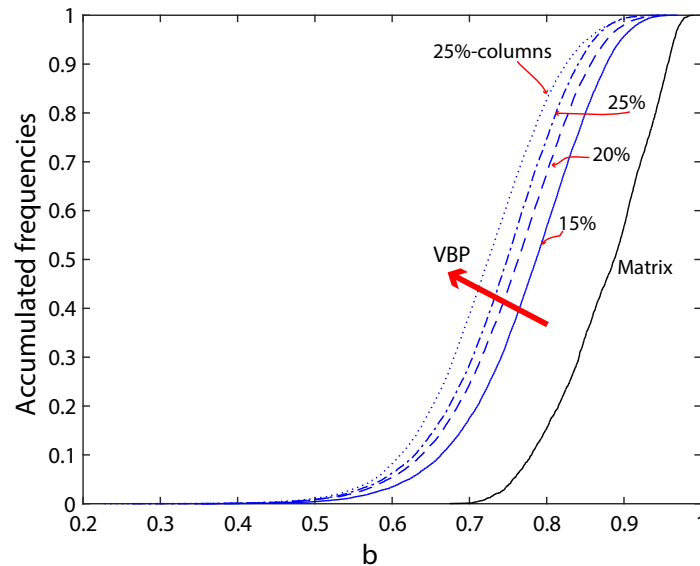
**Figura 6.** Variation of the accumulated frequencies of the angle between the minor principal stress  $\sigma_3$  and the vertical axis  $z$  with the axial deformation in bimsoils samples with  $VBP$  of 25 % and block size  $0.12 D$ .

the contribution from cohesion—originating from the clay matrix between blocks—diminishes (Iannacchione and Vallejo, 2000).

Figure 8 shows that the mobilized strength envelope for different strain levels follows a linear trend. For confining stress levels exceeding 500 kPa, it could be expected that the strength envelope of a geomaterial would exhibit a curvilinear behavior, suggesting that a linear Mohr-Coulomb strength model with respect to the confinement stress would not be the most suitable to represent this behavior. However, this is not the case for the numerical results presented in Figure 8, as the stress confinement levels used in the triaxial simulations were 75 kPa, 150 kPa, and 300 kPa.

## Effect of blocks size on the strength of bimsoils

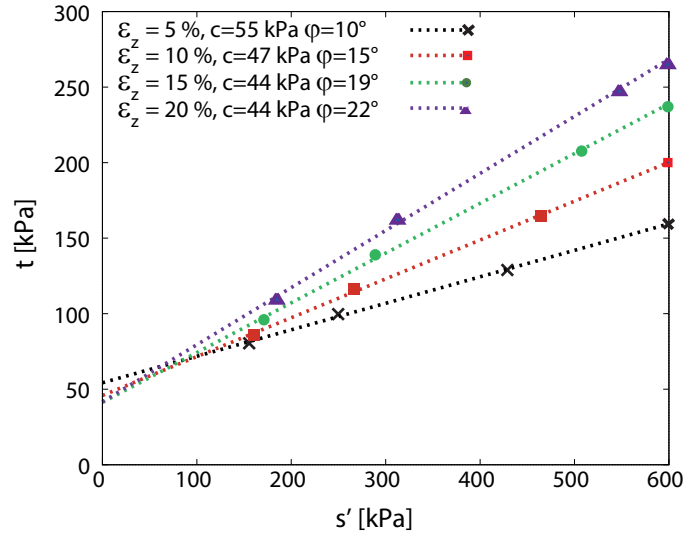
The present study focuses on bimsoils composed of uniformly sized blocks throughout the specimen, allowing for the isolated analysis block size and  $VBP$ , without considering the effect size gradation. The size of the blocks does indeed influence the strength of bimsoils and the one that provides the greatest strength is the range from  $0.12D$  to  $0.15D$  for the three  $VBP$  used. Figure 5 shows the deviator stress - axial strain curves of bimsoils for different  $VBP$ s.



**Figura 7.** Cumulative frequencies of the ratio of intermediate principal stresses  $b$  in bimsoils samples for a block size  $0.12D$  at 10 % deformation.

In the same way, the mobilized friction angle and cohesion are greater for bimsoils with blocks of size  $0.12D$  and  $0.15D$ , as seen in Figures 9 and 10 for different levels of axial deformation. The variation of the mobilized friction angle and cohesion, normalized with respect to the friction angle and cohesion of the matrix, has been represented on three-dimensional surfaces where the independent axes are the variable  $VBP$  and the block size normalized by the diameter of the sample. Both parameters increase with the  $VBP$ , and with respect to block size, they increase up to the  $0.12D$  to  $0.15D$  range before decreasing. This shape of the surfaces indicates that there is a direct relationship between the size  $0.12D$  and the magnitude and transfer of stresses that are generated in the sample. This is illustrated in Figure 11, where the sample with blocks  $0.12D$  presents more zones with stresses greater than 350 kPa.

When analyzing shear stresses greater than 350 kPa generated in the nodes of the sample, it was observed that for a  $VBP$  of 25 %, both the mean and the coefficient of variation of the shear stresses are greater for the block size  $0.12D$ . As shown in Figure 11, a greater number of high-stress zones (above 350 kPa) are distributed throughout the sample for this configuration. The cumulative frequencies of the Von Mises invariant of the sample nodes, defined by Eq. 2 where  $S$  denotes the full tensorial deviatoric stress, indicate that the range of stresses increases with axial deformation. By comparing stresses at 75 % (quartile 3) and 25 % (quartile 1) of these distributions, significant differences emerge among bimsoils with varying block sizes. To quantify this variation, the Heterogeneity Index was defined ( $HI = \sigma_{75\%}/\sigma_{25\%}$ ). This in-

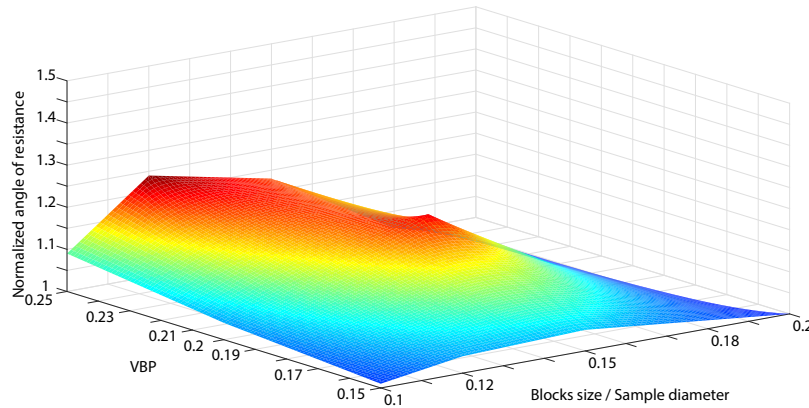


**Figure 8.** Mobilised friction angle and cohesion for different levels of axial deformation of a Bimsoil with *VBP* of 25 % and blocks size of 0.12*D*.

dex provides a measure of stress distribution within the sample: higher values of *HI* indicate a more heterogeneous distribution of shear stresses and correspond to higher coefficients of variation.

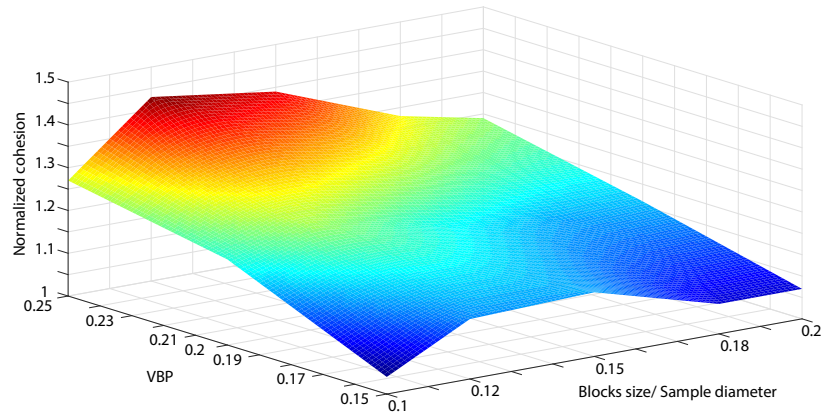
$$q = \sqrt{\frac{3}{2}(\mathbf{S} : \mathbf{S})} \quad \text{with} \quad \mathbf{S} = \boldsymbol{\sigma} - \frac{1}{3}\text{tr}(\boldsymbol{\sigma})\delta_{ij} \quad (2)$$

The *HI* of all samples at different strain levels is higher for samples with block size 0.12*D*. This indicates a direct relationship between size 0.12*D* and the heterogeneity of the efforts it generates. Figure 12 shows the variation of the Heterogeneity Index with size and *VBP* for an axial strain level of 10 %. For *VBP* of 25 %, the average Von Mises stresses and the size 0.12*D*

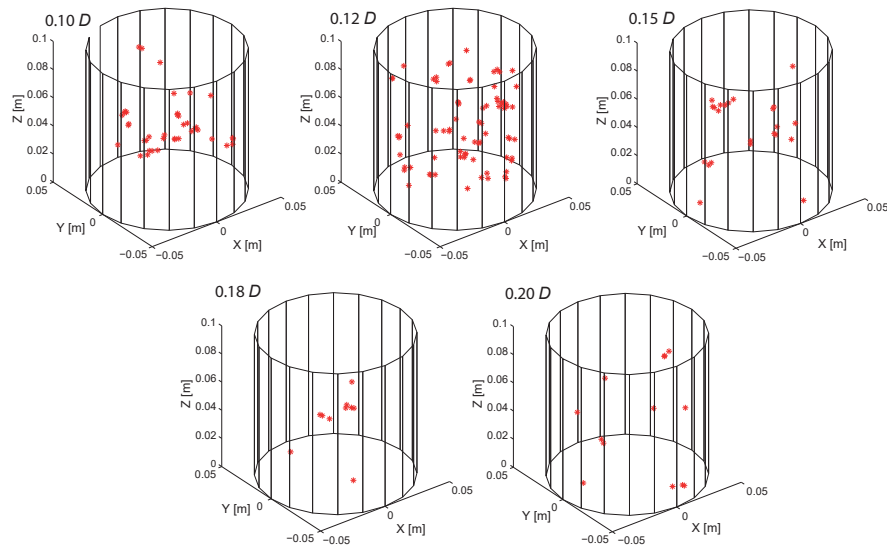


**Figure 9.** Variation of the mobilized friction angle depending on the size and *VBP* at 10% deformation.





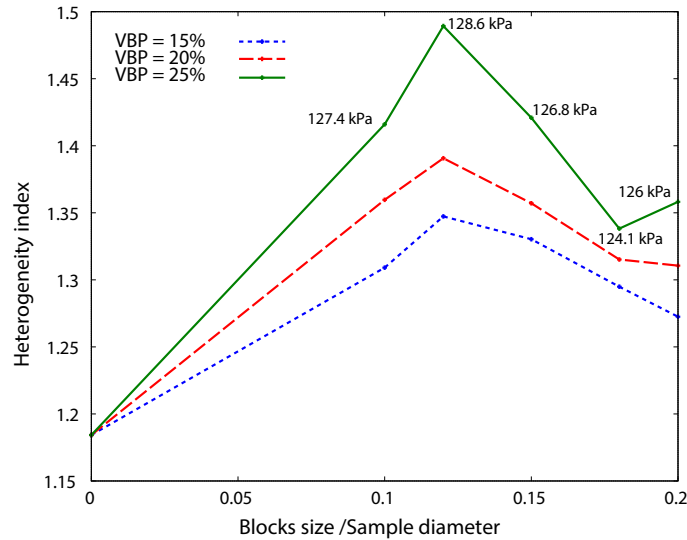
**Figura 10.** Variation of the cohesion depending on the size and *VBP* at 10 % deformation.



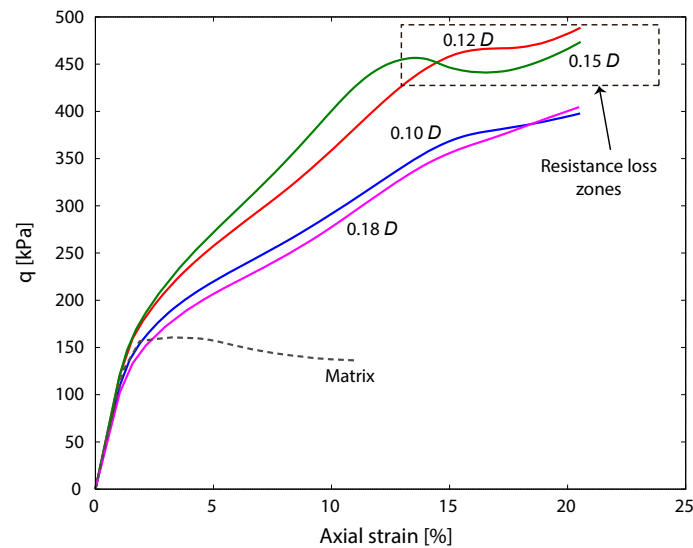
**Figura 11.** Shear stresses greater than 350 kPa in bimsoils samples with *VBP* of 25 %.

exhibit a higher average shear stresses and *HI*, leading to the conclusion that this block size generates a greater shear stress magnitude and a more heterogeneous stress distribution within the sample. Furthermore, when increasing the *VBP* the block size of  $0.2D$  generates a heterogeneity index greater than the block size  $0.18D$ , which is also reflected in the surfaces of the Figure 9.

The block size does not influence the orientation of the principal stress directions within the sample, as all the samples at the same *VBP* show no variation in the cumulative probability distribution curves. Hence, the size only influences the magnitude and distribution of the shear stresses.

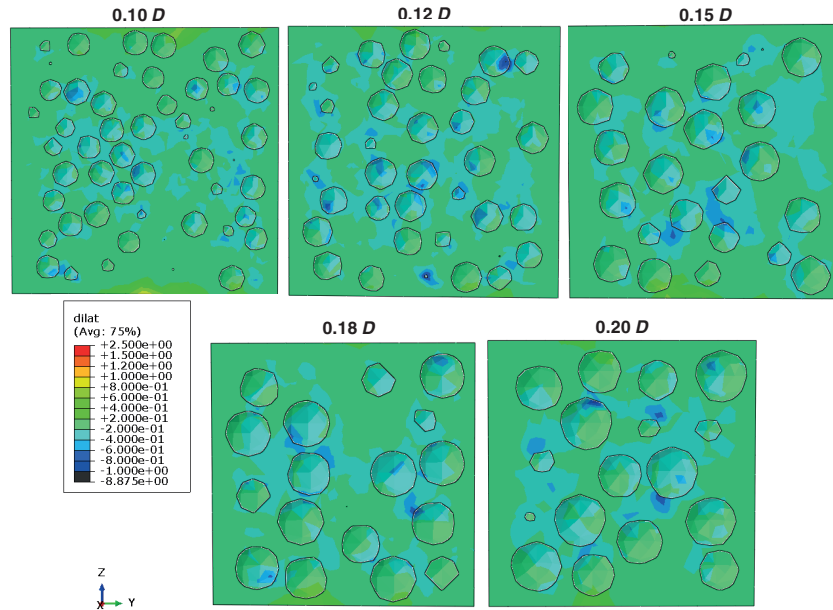


**Figure 12.** Variation of the heterogeneity index with blocks size and  $VBP$ .



**Figure 13.** Axial strain-stress curves in bimsoils with  $VBP = 25\%$  and columns spatial distribution.

By varying the location of blocks from a uniform random array to a columnar configuration without changing  $VBP$ , the effect of block size  $0.12D$  is maintained. Triaxial simulations were conducted on bimsoils with a  $VBP$  of  $25\%$  and different sizes, with the blocks positioned vertically one above the other to form columns. The results of the models indicate that the strength of bimsoils with a columnar location is twice that of the uniform location and that block sizes  $0.12D$  and  $0.15D$  develop greater strength than the other sizes. This new spatial distribution of



**Figure 14.** Compaction areas for bimsoils samples with  $VBP$  of 25 %.

the blocks greatly affects the shear strength and generates areas of loss of strength when the blocks break the configuration of columns (strain greater than 10 %) and regain strength when nearby blocks support their new position (see Figure 13).

As previously described by [Irfan and Tang \(1993\)](#) and [Medley and Rehermann \(2004\)](#), block location is a variable that influences the magnitude of the stresses and the anisotropy of the stress state. The bimsoil sample with  $VBP$  of 25 % and columnar block arrangement (independent of block size) greater stress anisotropy is observed. This is reflected in a lower value of  $b$ , compared to bimsoils with the same  $VBP$ , but uniform location (see Figure 7).

In all cases, sizes  $0.12D$  and  $0.15D$  result in greater shear strength, as reflected in the mobilized friction and cohesion. The increase in mobilized friction angle is attributed to global dilation, measured at the nodes of the sample periphery. The higher cohesion is due to the formation of compaction areas in the matrix located between blocks, measured in the nodes and exhibiting the greatest deformation. This aligns with the findings of [Miller and Sowers \(1958\)](#) who analyzed the influence of  $VBP$  in experimental laboratory tests. Figure 14 shows the mapping of the compaction areas obtained from dilation values at all sample nodes. Dilation is represented by the positive sign and contraction by the negative sign. The presence and concentration of compaction areas (blue contours) in the samples with blocks of size  $0.12D$  and  $0.15D$  is greater than in the other samples.

## Conclusions

Numerical simulations in ABAQUS of triaxial compression tests on mixtures of rigid blocks embedded in a fine matrix revealed that shear strength increases with rising *VBP* when the axial strain exceeds 3 %. This trend is evident in the Mohr-Coulomb shear strength parameters—specifically, the friction angle and cohesion. At this level of axial strain, anisotropy in the directions of the principal stresses begins to develop within the samples. As a result, the contribution of rigid blocks to large deformations becomes significant, as observed by Barton [Barton \(2013\)](#). The *VBP* influences the stress state; when it increases the anisotropy in the magnitude of the principal stresses—defined by the relation of intermediate stresses *b*—also increases.

For all *VBP*s, the bimsoils shear strength increases with increasing size, up to a threshold between 12 % and 15 % of the sample diameter. These block sizes allow for geometric configurations that generate a greater quantity and magnitude of Von Mises deviatoric stresses at the nodes, making the samples more heterogeneous compared to those with other block sizes.

The heterogeneity of the shear stresses in the sample was quantified using a proposed Heterogeneity Index *HI*, defined as the relationship between quartile 3 and quartile 1 of shear stress values. A higher *HI* indicates more extensive branching of stresses throughout the sample. The highest *HI* was observed in samples with blocks of size  $0.12D$ , no matter the *VBP*. For a *VBP* of 25 %, shear stresses developed are 45 % greater than the stresses in samples with other block sizes (see Figure 12).

Block location within the specimens is an important variable in bimsoils shear strength. For the same *VBP* and any block size, the samples with blocks forming columns generate twice the magnitude of shear strength and higher anisotropy of the stress state than the samples with blocks located uniformly. This behavior is explained because the location in columns facilitates the immediate transmission of stresses.

The angle of friction has a predominantly dilating component and is higher for sizes of  $0.12D$  and  $0.15D$ , due to greater global dilation, which was measured at the nodes located on the periphery of the sample.

Similarly, cohesion is higher for sizes of  $0.12D$  and  $0.15D$ , resulting from the formation and concentration of compaction zones within the matrix between blocks (see Figure 14). These compaction areas aligned with the theory proposed by [Miller and Sowers \(1958\)](#), based on an experimental investigation of bimsoils with clayey matrices, as further discussed by [Iannacchione and Vallejo \(2000\)](#).

The mobilized strength envelope for different strain levels and  $VBP$  values is linear in the MIT-Lambe triaxial stress invariants space. This behavior can be attributed to the moderate employed in the present simulations. It is expected that, under higher confinement stress levels, the strength envelope would exhibit nonlinear behavior. Likewise, further analysis using very low confinement stresses could help determine whether the nonlinearity observed in experimental studies of other geomaterials also applies to bimsoils.

## References

- Afifipour, M. and Moarefvand, P. (2014). Mechanical behavior of bimrocks having high rock block proportion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 65:40–48. ↑ 33
- Avşar, E. (2020). Contribution of fractal dimension theory into the uniaxial compressive strength prediction of a volcanic welded bimrock. *Bull. Eng. Geol. and the Envir.*, 79(7):3605–3619. ↑ 33
- Avşar, E. (2021). An experimental investigation of shear strength behavior of a welded bimrock by meso-scale direct shear tests. *Eng. Geology*, 294:106321. ↑ 33
- Barton, N. (2013). Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(4):249–261. ↑ 40, 48
- Cao, Z., Chen, J., Cai, Y., Gu, C., and Wang, J. (2017). Effects of moisture content on the cyclic behavior of crushed tuff aggregates by large-scale tri-axial test. *Soil Dyn. Earthqu. Eng.*, 95:1–8. ↑ 33
- Cen, D., Huang, D., and Ren, F. (2017). Shear deformation and strength of the interphase between the soil–rock mixture and the benched bedrock slope surface. *Acta Geotech.*, 12:391–413. ↑ 33
- Chu, B., Pan, J., and Chang, K. (1996). Field geotechnical engineering properties of gravel formations in western taiwan. *Sino-Geotechnics*, 55:47–58. ↑ 33
- Chu, B.-L., Jou, Y.-W., and Weng, M.-C. (2010). A constitutive model for gravelly soils considering shear-induced volumetric deformation. *Can. Geotech. J.*, 47(6):662–673. ↑ 33
- Coli, N., Berry, P., and Boldini, D. (2011). In situ non-conventional shear tests for the mechanical characterisation of a bimrock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(1):95–102. ↑ 32, 33

- Coli, N., Berry, P., Boldini, D., and Bruno, R. (2009). Investigation of block geometrical properties of the shale-limestone chaotic complex bimrock of the santa barbara open pit mine (italy). In *Rock Engineering in Difficult Conditions, 3rd Canada–US Rock Mechanics Symposium, Toronto (CA)*, pages 9–14. ↑ 32
- Donaghe, R. and Torrey, V. (1979). Scalping and replacement effects on strength parameters of earth-rock mixtures. In *Proc. Conf. on Design Parameters in Geotechnical Engineering*, volume 2, pages 29–34. ↑ 33
- Gao, W., Iqbal, J., and Hu, R. (2021). Investigation of geomechanical characterization and size effect of soil-rock mixture: a case study. *Bull. Eng. Geol. and the Envir.*, 80(8):6263–6274. ↑ 33
- Gong, J. and Liu, J. (2015). Analysis on the mechanical behaviors of soil-rock mixtures using discrete element method. *Procedia Engineering*, 102:1783–1792. ↑ 32
- Hibbitt, Karlsson, and Soreson (2001). *ABAQUS/Standard User's Manual*. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., United States (Pawtucket). ↑ 37, 39
- Holtz, W. (1960). Discussion of testing equipment, techniques and errors. In *Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*, pages 997–1002. ASCE. ↑ 32
- Holtz, W. and Gibbs, H. J. (1956). Triaxial shear tests on pervious gravelly soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 82(1):1–22. ↑ 33
- Hu, Y., Sun, S., Sun, Y., Wei, J., Le, H., Li, K., and Zhao, B. (2024). An experimental investigation of the effects of block proportion on bimrocks, considering different block-to-matrix strength ratios. *Materials*, 17(5):1114. ↑ 33
- Iannacchione, A. T. and Vallejo, L. E. (2000). Shear strength evaluation of clay-rock mixtures. *Geotechnical Special Publication*, pages 209–223. ↑ 42, 48
- Irfan, T. and Tang, K. (1993). *Effect of the coarse fractions on the shear strength of colluvium*. Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department. ↑ 32, 40, 47
- Ishikawa, T. and Miura, S. (2015). Influence of moving wheel loads on mechanical behavior of submerged granular roadbed. *Soils Found.*, 55(2):242–257. ↑ 33
- Jin, L., Zeng, Y., Xia, L., and Ye, Y. (2017). Experimental and numerical investigation of mechanical behaviors of cemented soil–rock mixture. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35:337–354. ↑ 33
- Kahraman, S. and Alber, M. (2006). Estimating unconfined compressive strength and elastic modulus of a fault breccia mixture of weak blocks and strong matrix. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 43(8):1277–1287. ↑ 32

- Kahraman, S., Alber, M., Fener, M., and Gunaydin, O. (2008). Evaluating the geomechanical properties of misis fault breccia (turkey). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(8):1469–1479. ↑ 32
- Kahraman, S., Alber, M., Fener, M., and Gunaydin, O. (2010). The usability of cerchar abrasivity index for the prediction of ucs and e of misis fault breccia: regression and artificial neural networks analysis. *Expert Systems with Applications*, 37(12):8750–8756. ↑ 32
- Kalender, A., Sonmez, H., Medley, E., Tunusluoglu, C., and Kasapoglu, K. (2014). An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils. *Engineering Geology*, 183:65–79. ↑ 31
- Lade, P. V. and Wasif, U. (1988). Effects of height-to-diameter ratio in triaxial specimens on the behavior of cross-anisotropic sand. In *Advanced triaxial testing of soil and rock*. ASTM International. ↑ 36
- Liang, S., Xiao, X., and Feng, D. (2023). Study on large-scale direct shear test on soil–rock mixture in an immersion state under water. *International Journal of Geomechanics*, 23(2):04022294. ↑ 33
- Lindquist, E. and Goodman, R. (1994). Strength and deformation properties of a physical model melange. In *1st North American Rock Mechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association. ↑ 31, 32, 33
- Mahdevari, S. and Moarefvand, P. (2018). Experimental investigation of fractal dimension effect on deformation modulus of an artificial bimrock. *Bull. Eng. Geol. and the Envir.*, 77:1729–1737. ↑ 33
- Medley, E. (1994). Using stereological methods to estimate the volumetric proportions of blocks in melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks). In *7th International IAEG Congress, Lisboa, Portugal*, pages 1031–1040. ↑ 31
- Medley, E. (2004). Observations on tortuous failure surfaces in bimrocks. *Felsbau, J. of Engineering Geology, Geomechanics and Tunnelling*, 22:35–43. ↑ 31
- Medley, E. and Goodman, R. E. (1994). Estimating the block volumetric proportions of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks). In *1st North American Rock Mechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association. ↑ 31
- Medley, E. V. and Lindquist, E. S. (1995). The engineering significance of the scale-independence of some franciscan melanges in california, usa. In *The 35th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association. ↑ 32, 36

- Medley, E. W. (2002a). Estimating block size distributions of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks). In *Proc. 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada*. ↑ 31
- Medley, E. W. (2002b). Estimating block size distributions of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks). In *Proc. 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada*. ↑ 32
- Medley, E. W. and Rehermann, P. F. S. (2004). Characterization of bimrocks (rock/soil mixtures) with application to slope stability problems. ↑ 47
- Medley, E. W. and Zekkos, D. (2011). Geopractitioner approaches to working with antisocial mélanges. *Geological Society of America Special Papers*, 480:261–277. ↑ 31, 32
- Miller, E. A. and Sowers, G. F. (1958). The strength characteristics of soil-aggregate mixtures & discussion. *Highway Research Board Bulletin*, 14(183). ↑ 32, 36, 47, 48
- Patwardhan, A., Rao, J., and Gaidhane, R. (1970). Interlocking effects and shearing resistance of boulders and large size particles in a matrix of fines on the basis of large scale direct shear tests. In *Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conference on Soil Mechanics, Singapore. Southeast Asian Geotechnical Society, Pathumthani, Thailand*, pages 265–273. ↑ 32
- Ramos-Cañón, A. M., Castro-Malaver, L. C., Padilla-Bello, N. V., and Vega-Posada, C. A. (2020). Incertidumbre en la determinación del porcentaje volumétrico de bloques de bimrocks/bimsoil a partir de información unidimensional. *Boletín de Geología*, 42(1):69–80. ↑ 31
- Rathee, R. (1981). Shear strength of granular soils and its prediction by modeling techniques. *Journal of the Institution of Engineers (India)*, pages 64–70. ↑ 33
- Raymond, L. A. (1984). *Melanges: Their nature, origin, and significance*, volume 198. Geological Society of America. ↑ 31
- Sachan, A. and Penumadu, D. (2007). Effect of microfabric on shear behavior of kaolin clay. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 133(3):306–318. ↑ 34, 35
- Sharafisafa, M., Aliabadian, Z., Sato, A., and Shen, L. (2024). Effect of strain rate on the failure of bimrocks using the combined finite-discrete element method. *Computers and Geotechnics*, 176:106712. ↑ 33
- Sheikhpourkhani, A., Bahaaddini, M., Oh, J., and Masoumi, H. (2024). Numerical study of the mechanical behaviour of unwelded block in matrix rocks under direct shearing. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(1):22. ↑ 33







- Sonmez, H., Altinsoy, H., Gokceoglu, C., and Medley, E. (2006). Considerations in developing an empirical strength criterion for bimrocks. In *Proc. 4th Asian Rock Mechanics Symposium, Nov 6-10 2006, Singapore*. ↑ 32, 36
- Wang, S., Zhu, Y., Ma, W., Wang, Z., and Li, G. (2021). Effects of rock block content and confining pressure on dynamic characteristics of soil-rock mixtures. *Eng. Geology*, 280:105963. ↑ 33
- Wang, Y., Que, J., Wang, C., and Li, C. (2018). Three-dimensional observations of meso-structural changes in bimsoil using x-ray computed tomography (ct) under triaxial compression. *Constr Build Mater.*, 190:773–786. ↑ 33
- Wen-Jie, X., Qiang, X., and Rui-Lin, H. (2011). Study on the shear strength of soil–rock mixture by large scale direct shear test. *Int. J. for Rock Mech. and Mining Sciences*, 48(8):1235–1247. ↑ 33
- Zhang, H.-Y., Xu, W.-J., and Yu, Y.-Z. (2016a). Triaxial tests of soil–rock mixtures with different rock block distributions. *Soils Found.*, 56(1):44–56. ↑ 33
- Zhang, L. (2016). *Engineering Properties of Rocks*. Elsevier Science. ↑ 34
- Zhang, Z.-L., Xu, W.-J., Xia, W., and Zhang, H.-Y. (2016b). Large-scale in-situ test for mechanical characterization of soil–rock mixture used in an embankment dam. *Int. J. for Rock Mech. and Mining Sciences*, 86:317–322. ↑ 33



## Design and Testing of a Density Sensor for Biological Wastewater Treatment in a Pilot Plant

### Diseño y prueba de un sensor de densidad para el tratamiento biológico de aguas residuales en una planta piloto

José Aldemar Muñoz Hernández <sup>1</sup>, Helmer Muñoz Muñoz Hernández <sup>2</sup>, Kavir Alá Oviedo Prioló <sup>3</sup> and Roberto Carlos Osorio Mass <sup>4</sup>,

Fecha de Recepción: 21 de marzo de 2023

Fecha de Aceptación: 16 de octubre de 2024


**How to cite:** Muñoz Hernández J.A., Muñoz Hernández H.M., Oviedo Prioló K.A. and Osorio Mass R.C. (2024). Design and Testing of a Density Sensor for Biological Wastewater Treatment in a Pilot Plant. *Tecnura*, 28(81), 54-66. <https://doi.org/10.14483/22487638.20618>


## Abstract


This paper investigates the design of a density sensor for wastewater treatment. Piezoelectric crystals were chosen for this application, although a vibrating tube element could also be used. The physical implementation, data processing, and sensor's electronic components are presented. The proposed sensor is capable of measuring density and characterizes the density profile inside the clarifier, as density correlates with the amount of flocs and dirt in the water. The entire sensing component of the sensor has been successfully developed and tested, with a preference for piezoelectric crystals. This sensor can differentiate between clean and dirty water, as it presents distinct output signals for both media at varying frequencies. Additionally, the electronic part of the sensor has been developed and tested, yielding satisfactory results.

**Keywords:** biological, piezoelectric crystal, ultrasonic, sensor.

<sup>1</sup>Petroleum Engineer, Universidad Surcolombiana- USCO Colombia. DSc in Engineering, Universiteit Leuven, Belgium. MSc en Automatic Control, Rijksuniversiteit Te Gent, Bélgica. Lecturer at Universidad del Tolima, Colombia . Email: [amunoz@ut.edu.co](mailto:amunoz@ut.edu.co)

<sup>2</sup>Systems Engineer, National Unified Corporation of Higher Education CUN . DSc in Management, Universidad Dr. Rafael Belloso Chacín, Venezuela. MSc in Industrial Control Engineering, Universidad de Ibagué, Colombia. AXON research group leader, Colombia. Email: [Helmer\\_munoz@cun.edu.co](mailto:Helmer_munoz@cun.edu.co)

<sup>3</sup>Physicist, Master of Business Administration, Systems Engineering Program Teacher, Member of the AXON Research Group, Category A in Minciencias, Unified Corporation of Higher Education CUN . Email: [kavir.oviedo@cun.edu.co](mailto:kavir.oviedo@cun.edu.co)

<sup>4</sup>Research Professor, Business Administration Program, Cooperative University of Colombia . Industrial Engineer, MSc in Business Management and Administration. Email: [roberto.osoriorom@campusucc.edu.co](mailto:roberto.osoriorom@campusucc.edu.co)

## Resumen

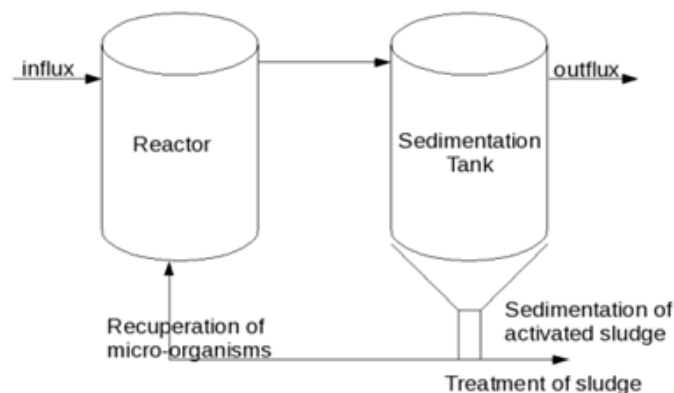
Este artículo investiga el diseño de un sensor de densidad para el tratamiento de aguas residuales. Para el estudio, se seleccionaron cristales piezoeléctricos, aunque un elemento de tubo vibratorio también puede ser utilizado. Se presenta la implementación física, el procesamiento de datos y la parte electrónica correspondiente al sensor. El sensor propuesto es capaz de medir la densidad y es utilizado para caracterizar el perfil de densidad dentro del clarificador, ya que la densidad está relacionada con el número de flóculos y suciedad en el agua. Se ha realizado y probado toda la parte de detección del sensor, dando preferencia al uso de cristales piezoeléctricos. Se demostró que este sensor tiene la capacidad de distinguir entre agua limpia y sucia, pues generó señales de salida distintas para ambos tipos de agua a diferentes frecuencias. Además, la parte electrónica del sensor ha sido desarrollada y probada, obteniendo resultados satisfactorios.

**Palabras clave:** biológico, cristales piezoeléctricos, ultrasonido, sensor.

---

## Introduction

The plant consists of two tanks. In the first one, microorganisms degrade waste primarily into carbon dioxide, which can escape from the tank. In the second tank, microorganisms form flocs that undergo sedimentation. As a result of this process, clean water can be drawn from the top of the reactor. Figure 1a shows a schematic of the plant. This biological aerobic method for water treatment, known as the activated sludge process, can operate continuously or semi-continuously, with microbial growth controlled within the reactor to regulate the process.



**Figure 1a.** Schematic diagram of the Pilot Wastewater Treatment Plant

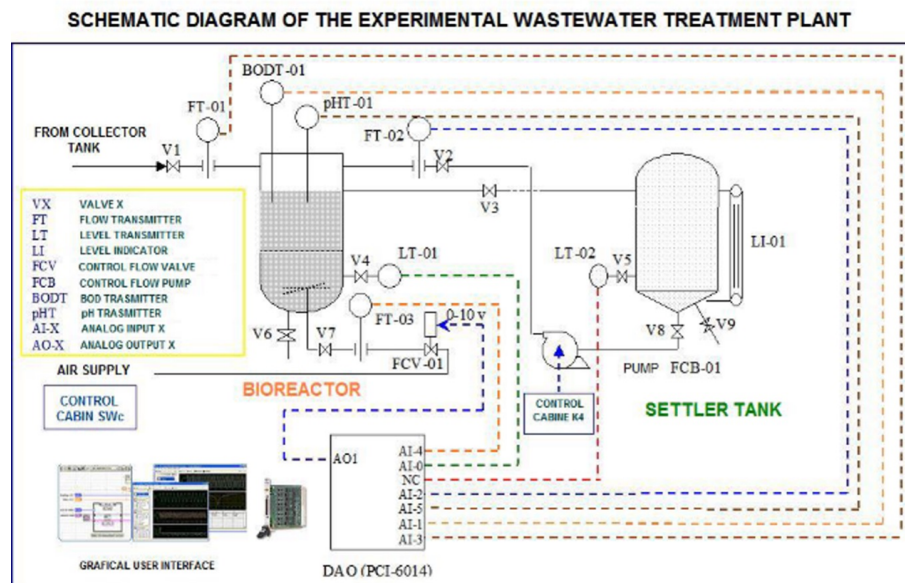
Activated sludge is based on the aeration of wastewater with flocculating biological growth, followed by the separation of treated wastewater from this growth. A portion of the biomass is discarded, while the remainder is returned to the system (bioreactor), consisting of a mixed community of microorganisms that metabolize and transform organic and inorganic substances into environmentally acceptable forms. The microbiology of activated sludge typically consists of approximately 95 % bacteria and 5 % higher organisms (protozoa, rotifers, and higher

forms of invertebrates). This mixture of microorganisms contacts and digests biodegradable materials (=food) from wastewater. Thus, activated sludge is a biological process that can be regulated by properly controlling the growth of the microorganisms (biomass concentration). The separation of the growth from the treated wastewater is usually performed by settling, but it may also be done by flotation or other methods. The particles suspended in surface water range in size from  $10^{-1}$  to  $10^{-7}$  mm in diameter. Very small particles, those smaller than  $10^{-4}$  mm in diameter, are treated by dissolution. Wastewater containing particulate matter flows slowly through the settler tank (sedimentation tank) and is retained for an extended period (typically 3 hours in tanks 3 to 5 meters deep) to allow larger particles to settle at the bottom—due to their high density—before the clarified water exits the tank (outflux). The settled particles are removed manually or mechanically using scrapers.

## Methods

### Generalities

A general figure of the plant is shown in Figure 1b.



**Figure 1b.** Schematic diagram of the Pilot Wastewater Treatment Plant

Sedimentation occurs in the second tank, therefore, the clean water will be in the upper part of the tank. It would be highly beneficial to determine the height at which the water is clean enough to be tapped from the tank. This can be achieved using a density sensor, as density correlates with the number of flocs and dirt in the water. By controlling sludge concentration

in the settler tank, it treated sewage can be effectively purified in a wastewater treatment plant using the activated sludge process. Therefore, measurement instruments enabling continuous and accurate monitoring of sludge are required.

The flocs will then settle, forming a density profile along the tank, which must be identified to obtain the point at which clean water can be extracted from the plant. [Cho \*et al.\* \(1996\)](#) presented modeling and control of the sludge settling characteristics and the conditions of sludge thickening or clarification in the settler tank, showing the importance of designing sensors to measure density profile inside these tanks. A good design for measuring the density is presented in [Chen \*et al.\* \(1996\)](#) and [Muñoz \(2013\)](#), where it is shown that settling characteristics for sludge are important in determining the performance of the settler, as well as for the efficiency of the wastewater treatment plant.

The Vibrating Tube Element design is one of the most widely accepted methods for density measurements ([Bentley, 2005](#)). It employs a vibrating element because the displacements produced by the coils are minimal. Due to the large temperature variations inside the water clearance reactor, this design requires compensation for temperature effects using a temperature element.

A transverse force is applied to the clamped tube using a drive coil connected to a maintaining amplifier in a resonator circuit. This force induces a transverse deflection at the tube's center, which is detected by a pick-up coil and fed back to the amplifier.

The sensor's accuracy depends on the mass—if the mass is too large, accuracy decreases. The tube can be held to a transverse oscillation at the fundamental frequency by properly selecting the gain of the operational amplifier and the phase characteristics.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{A}{f_n^2} + \frac{B}{f_n} + C \quad (2)$$

$f_n$ : fundamental frequency, Hz

$\rho$ : Fluid density, kg/m<sup>3</sup>

$m$ : sensor mass, kg.

A, B, and C: experimentally values.

Puttmer *et al.* (2000) proposed a design using piezoelectric crystals to overcome the accuracy limitations of the resonant tube. Muñoz (2013), in turn, implemented a piezoelectric design by positioning both crystals with their sensitive axes aligned to maximize output at the sensor's receiver. A gap was created in the plastic board between the crystals, allowing fluid to enter and enabling fluid analysis.

Since the sensor operates in an aqueous environment, its conductive components had to be isolated. For this primary design, a transparent nail polish was used which was able to give some satisfying results.

### Physical implementation

The transmitting part of the sensor was connected to a function generator to characterize the entire circuit at different frequencies. However, challenges arose due to a high capacitive coupling between the input and output, as described later.

The receiving part of the sensor was connected to a filter circuit, which is essential for analyzing the fluid under investigation. Various filtering circuit designs are presented in the following subsections.

### Ultrasonic waves

The transmitting piezoelectric crystal emits ultrasonic waves with a frequency above 20 kHz into the fluid whose density is to be measured. Before reaching the receiving piezoelectric crystal, these waves partially reflect at the interfaces between different materials. Understanding how ultrasonic (US) waves propagate through various media and interact at these interfaces is crucial for maximizing energy transfer from the input to the output.

However, direct calculation of the energy transfer was problematic due to the lack of datasheets for the medical ultrasound sensor. As a result, the piezoelectric crystals had to be characterized first. For this characterization, test data were compared with the computed data in MATLAB.

To maximize energy transfer, a backing and buffer layer were also incorporated. Cellulose acetate (nail polish) was chosen for the buffer layer due to its wide availability and suitability as an isolator. For the backing layer, a material with a significantly different acoustic impedance (ZL) was required to reflect as much energy as possible towards the fluid under investigation. To ensure effective and thick isolation—reducing capacitive coupling—and achieve a high ZL, anisotropic silicones were used.

## Materials

The characteristics of the various materials used are provided in Tables 1-4. This data enabled the calculation of variations in the output-to-input signal ratio as a function of the applied frequency. This information can be useful for identifying the type of piezoelectric material by comparing it with experimental data. Clean water was selected as the measuring medium for this experiment.

**Table 1. Characteristics of possible piezo crystals**

Material	VL[m=s]	$\rho$ [kg=m <sup>3</sup> ]	ZL[Rayl]	Np=m
PVDF	$2.3 \times 10^3$	$1.79 \times 10^3$	$4.2 \times 10^6$	$1 \times 10^2$
Quartz - X-cut	$5.75 \times 10^3$	$2.65 \times 10^3$	$15.3 \times 10^6$	$1 \times 10^2$
PZT	$4.72 \times 10^3$	$7.95 \times 10^3$	$37.5 \times 10^6$	$1 \times 10^2$

**Table 2. Buffer layer characteristics**

Material	VL [m=s]	$\rho$ [kg=m <sup>3</sup> ]	ZL [Rayl]	$\alpha$ [Np=m]
cellulose acetate	$2.45 \times 10^3$	$1.3 \times 10^3$	$3.18 \times 10^6$	$21.9 \times 10^2$

**Table 3. Backing layer characteristics**

Material	VL [m=s]	$\rho$ [kg=m <sup>3</sup> ]	ZL [Rayl]	$\alpha$ [Np=m]
Epoxy	$2.70 \times 10^3$	$1.21 \times 10^3$	$3.25 \times 10^6$	$4.5 \times 10^2$
Silicone	$8.43 \times 10^3$	$2.34 \times 10^3$	$19.7 \times 10^6$	$3.8 \times 10^2$

**Table 4. Measured layer characteristics**

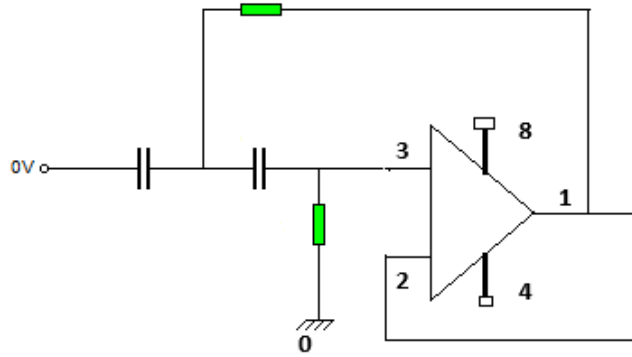
Material	VL [m=s]	$\rho$ [kg=m <sup>3</sup> ]	ZL [Rayl]	$\alpha$ [Np=m]
Water	$1.48 \times 10^3$	$1.0 \times 10^3$	$1.48 \times 10^6$	$23 \times 10^2 / (20 \log_{10} e)$
Air	$0.34 \times 10^3$	1.293	$0.42 \times 10^6$	1

## Data Processing and Electronics

The signal received from the piezoelectric crystal has a small amplitude and contains significant noise. Thus, it is necessary to amplify and filter the signal. The receiver circuit is composed of several components to achieve this.

**Part 1: High Pass Filter:** To eliminate low-frequency noise, particularly the 60 Hz frequency, a high-pass filter is required. There are several methods to achieve this. A few of them were tested and are described below.

**Sallen-Key Topology** (Thomas, 2008): The Sallen-Key filter is an active filter that makes use of an OPAMP, as shown in Figure 2.



**Figure 2.** Unity-Gain Sallen-Key High-Pass Filter

**Note:** Adapted from Thomas (2008).

At low frequencies, the capacitors behave like open circuits, meaning that low frequencies will not pass through to the output. The OPAMP should be a high-frequency OPAMP to ensure that the high-frequency signal is not attenuated.

The transfer function of this filter is given by:

$$A(s) = \frac{1}{1 + \frac{a_1}{s} + \frac{b_1}{s^2}} = \frac{s^2}{s^2 + a_1s + b_1} \quad (3)$$

Con,

$$a_1 = \frac{2}{w_c RC} \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{1}{w_c^2 R^2 C^2} \quad (5)$$

Since it is a second-order filter, the transfer function can also be expressed as:

$$A(s) = \frac{s^2}{(s + c)^2} = \frac{s^2}{s^2 + 2cs + cs^2} \quad (6)$$

where  $c = 2\pi 1000$ , with 1000 Hz as the cut-off frequency.



By comparing Equation (3) and Equation (6), it can be determined that resistors of  $25,300\ \Omega$  and capacitors of  $1\text{pF}$  are required.

**Second-Order Passive High Pass Filter:** This design (see Figure 3) consists of two simple first-order RC high-pass filters connected in series, with an OPAMP used as a buffer in between. The OPAMP prevents loading effects and should be a high-frequency OPAMP. To set the cut-off frequency at  $1000\text{ Hz}$ , capacitors of  $0.1\ \mu\text{F}$  and resistors of  $1500\ \Omega$  are used.

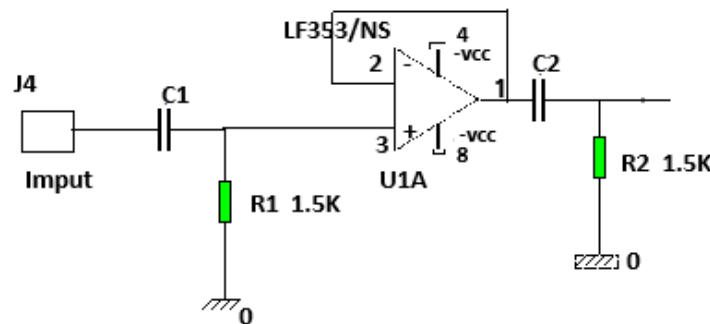


Figure 3. Second-Order Passive High Pass Filter

**Part 2: Non-Inverting Amplifier:** To amplify the received signal, a non-inverting amplifier is used, as shown in Figure 4.

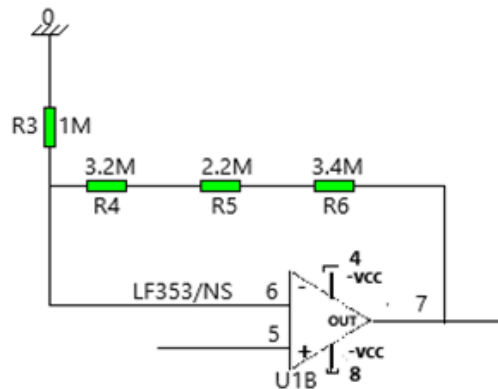
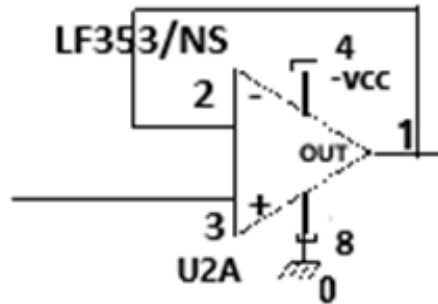


Figure 4. Non-Inverting Amplifier

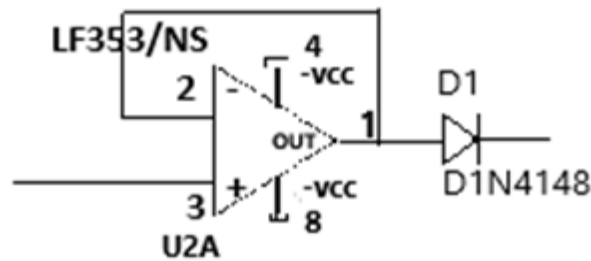
**Part 3: Rectifier:** To obtain a DC value from the signal, it is necessary to rectify it. The main challenge in this process is handling the high-frequency signal. Initially, a rectifier bridge was considered. An alternative approach is the circuit shown in Figure 5.

In this configuration, when the input is positive, the output follows the input. However, when the input is negative, the output becomes zero because the negative supply is connected to ground.



**Figure 5.** Rectifier using an OPAMP

Unfortunately, this approach is ineffective for high frequencies, likely due to the limited slew rate of OPAMP. To mitigate interference, an OPAMP configured as a buffer is placed before the diode, as shown in Figure 6.



**Figure 6.** Rectifier using a high frequency diode

**Part 4. Low Pass Filter:** To obtain a DC signal from the rectified signal, a low-pass filter with a 1 Hz cutoff frequency is used. For this, a resistor of  $3M\Omega$  and a capacitor of  $0.1\mu F$  are employed, as shown in Figure 7.

The different components and configurations were simulated using OrcadP Spice®, and based on these simulations, all components and options appeared to function as expected. After testing, the second-order passive high-pass filter outperformed the Sallen-Key topology for Part 1, so the second option was chosen.

## Processing circuit

The signal that is received from the piezo Cristal has only a small amplitude and contains a lot of noise. Therefore, it is necessary to amplify and filter the signal. The receiver circuit consists of multiple parts, as shown in Figure 8.

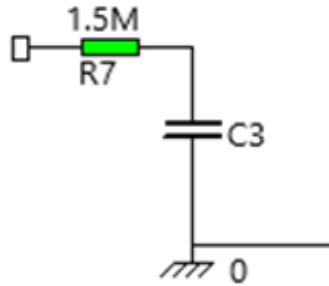


Figure 7. Low Pass Filter

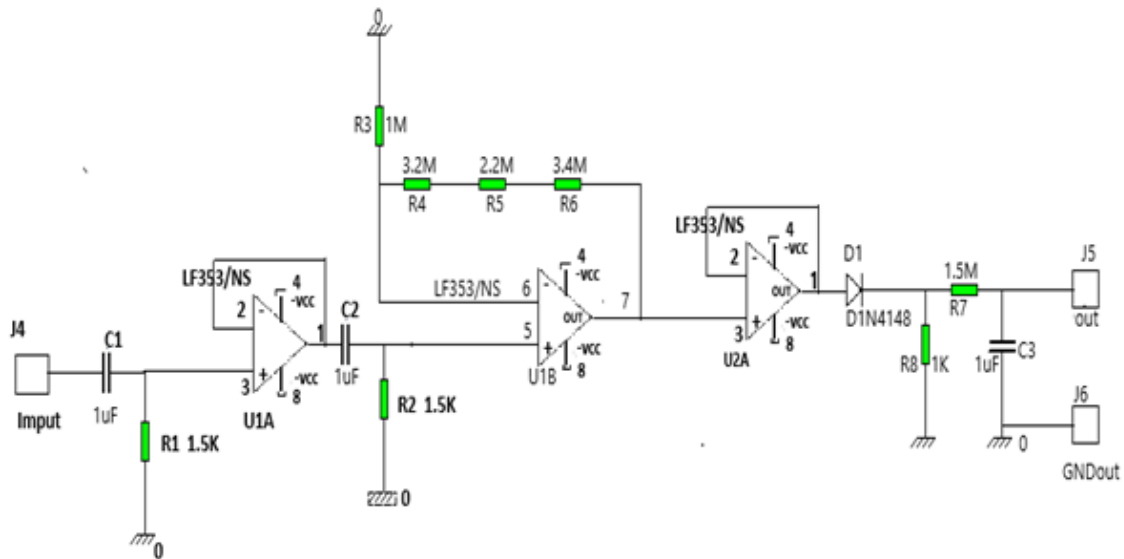


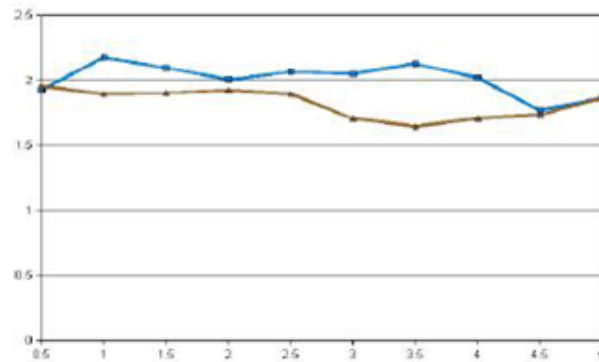
Figure 8. The final signal processing circuit

## Mechanical part

After assembling the sensor and integrating its electronics onto a PCB, the entire system must be mounted on a mechanical lifting device. This device should allow the sensor to move in a vertical direction to measure the height of the cleaned water. Since this height is influenced by the water's composition (density), the device should be designed to minimize any disturbance to its composition.

## Results

To test the viability of the sensor, several experiments were conducted. Figure 9 presents the frequency response of the sensor in both air and dirty water.



**Figure 9.** Frequency response of the sensor in clean and dirty water, in the x-axis the Frequency MHz) and in the y-axis the output voltage (V)

In the initial design of the sensor, some issues were encountered with the isolation of the conducting parts. As expected from our previous calculations, the output signal of the receiver part changed when the space between the two crystals was filled with water. However, as the sensor was further submerged, the output signal also increased. This phenomenon can be attributed to the capacitive coupling between the sender and receiver. Since the sender received a signal of approximately 10V, while the receiver detected only 1V, the capacitive coupling increased as the aqueous (conducting) environment filled the space between the varnished conducting parts.

A potential solution to this problem involves using a thicker isolation material that prevents water from entering the space between the conducting parts. This would ensure that only the space between the two crystals remains free for the fluid to occupy. To address this, a thicker isolation material, specifically anisotropic silicones, was used, as mentioned in the subsection about ultrasonic waves.

The sensor demonstrated optimal performance at 3.5 MHz, where the greatest difference in amplitude was observed between measurements in dirty and clean water.

Thus, there is a need for a highly sensitive, self-calibrating, online sensor to characterize the liquid in the settler during the settling process. [Bamberger and Greenwood \(2004\)](#) demonstrate the use of measurements of the reflections at the fluid-sensor interface, sound speed, and ultrasound attenuation to determine fluid density and solids concentration.

The state of technology of the ultrasonic sensor systems is shown in Henning and Rautenberg (2006), where the advantages and limitations of ultrasonic sensors are discussed.

## Conclusions

It became evident that the piezoelectric material used must be Lead Zirconium Titanate (PZT). Additionally, due to the significant temperature variations inside the water clearance reactor, this design requires temperature compensation using a temperature element.

The sensor can be applied to measure sludge levels in settling basins or tanks by detecting the interface layer between two or more phases. It can also be used to measure density profiles and thereby picture the heights of the different product layers inside a vessel. To enhance the sensor's performance, some extra improvements must be considered:

- Calibration of the sensor needs to be performed and compared with other industrial sensors.
- Linearity and some other static characteristics of the sensor must be evaluated.
- Further signal processing is needed to meet industrial standards.

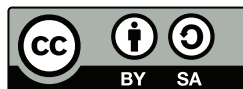
## Acknowledgements

The authors express their gratitude to the Universities of Tolima and CUN for providing the time and opportunity to contribute to the development of these projects related to the implementation of measurement technologies.

## References

- Bamberger, J. A. & Greenwood, M. S. (2004). Non-invasive characterization of fluid foodstuffs based on ultrasonic measurements. *Food research international*, 37(6), 621-625.
- Bentley, J. P. (2005). *Principles of measurement systems*. Prentice Hall.
- Cheeke, J. D. (2012). *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. CRC Press.
- Chen, G. W., Chang, I. L., Hung, W. T., & Lee, D. J. (1996). Regimes for zone settling of waste activated sludges. *Water Research*, 30(8), 1844-1850.
- Cho, S. H., Chang, H. N., & Prost, C. (1996). Steady state analysis of the coupling aerator and secondary settling tank in activated sludge process. *Water Research*, 30(11), 2601-2608.
- Density – the key to product consistency. (2001). *Sensor Review*, 21(4). <http://dx.doi.org/10.1108/sr.2001.08721dad.007>

- Farach-Colton, M. & Mosteiro, M. (2014). Initializing Sensor Networks of Non-Uniform Density in the Weak Sensor Model. *Algorithmica*, 73(1), 87-114. <http://dx.doi.org/10.1007/s00453-014-9905-5>
- Henning, B. & Rautenberg, J. (2006). Process monitoring using ultrasonic sensor systems. *Ultrasonics*, 44, e1395-e1399.
- Muñoz, J.A. (2013). Design of a density sensor based on piezoelectric crystals for the identification of the density profile in a wastewater treatment plant settler. IFAC proceedings volumes (*IFAC-Papers Online*), 4, 288–292.
- Puttmer, A., Hauptmann, P., & Henning, B. (2000). Ultrasonic density sensor for liquids. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 47(1), 85-92.
- Shang, Y. & Shi, H. (2007). Flexible Energy Efficient Density Control on Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 3(1), 5-21. <http://dx.doi.org/10.1080/15501320601066727>
- Kugelstadt, T. (2008). Active filter design techniques. In R. Mancini (Ed.), *Op Amps for Everyone* (pp. 16.1–16.60). Newness.
- Wang, X. (2009). Movement-assisted deployment for irregular sensor density in wireless sensor networks. *JCIT*, 4(2). <http://dx.doi.org/10.4156/jcit.vol4.issue2.wang>
- Weiss, B., Heinisch, M., Reichel, E., & Jakoby, B. (2013). Driving modes and material stability of a double membrane rheometer and density sensor. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2(1), 19-26. <http://dx.doi.org/10.5194/jsss-2-19-2013>



## Organizaciones socioambientales en defensa del territorio, frente al extractivismo minero-energético en el departamento de Caquetá (Colombia)

### Socio-environmental organizations in defense of the territory against energy mining extractives in the department of Caquetá

Mercedes Mejía Leudo <sup>1</sup>

Fecha de Recepción: 4 de septiembre de 2023

Fecha de Aceptación: 6 de julio de 2024

**Cómo citar:** Mejía Leudo M. (2024). Organizaciones socioambientales en defensa del territorio, frente al extractivismo minero-energético en el departamento de Caquetá (Colombia). *Tecnura*, 28(81), 67-85. <https://doi.org/10.14483/22487638.21220>

## Resumen

**Objetivo:** indagar sobre las organizaciones socioambientales que defienden el territorio, frente al extractivismo minero-energético en el departamento de Caquetá.

**Métodología:** el método de investigación fue fenomenológico-hermenéutico. Además, se implementaron entrevistas a representantes de organizaciones socioambientales.


**Resultados:** las organizaciones socioambientales adquieren un compromiso que provoca acciones de cambio con la promoción de la democracia. En Caquetá, este tipo de organizaciones está conformado por las juntas de acción comunal; Vicaría del Sur-Arquidiócesis de Florencia; Mesa Departamental para la Defensa del Agua y el Territorio del Caquetá; comisiones por la Vida del Agua; Coordinadora de Organizaciones Sociales, Étnicas y Ambientales del Caquetá; y la forma organizativa de núcleos veredales.

**Conclusiones:** la defensa del territorio es un aspecto en el que las organizaciones con las que se trabajó coinciden y son claras; igualmente, asumen que es un objetivo común que las moviliza, en momentos en que se presentan actividades extractivas y pueden causar daños sociales, ambientales, económicos y culturales.

**Palabras clave:** ambientalista, extracción, organización social, territorio.

## Abstract

**Objective:** Socio-environmental organizations investigate the defense of the territory against mining-energy extractives in the department of Caquetá.

<sup>1</sup>Ingeniera agrónoma, magíster en Agroforestería, doctora en Educación y Cultura Ambiental. Profesora del programa de Ingeniería Agroecológica de la Universidad de la Amazonía, Florencia (Caquetá, Colombia) . Email: [mmejia@uniamazonia.edu.co](mailto:mmejia@uniamazonia.edu.co)

**Methodology:** Central categories were defined, environmental, extractive, social organization, territory, with the help of the Thesauri of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), to find bibliographic trends. The research method was hermeneutic phenomenological. Interviews were conducted with representatives of socio-environmental organizations.

**Results:** It was found that socio-environmental organizations acquire a commitment that provokes actions of change with the promotion of democracy. In Caquetá, this type of organizations is made up of community action boards; Vicariate of the Southern Archdiocese of Florence; Departmental Committee for the Defense of Water and the Territory of Caquetá; commissions, for the Life of Water; Coordinator of Social, Ethnic and Environmental Organizations of Caquetá, and the organizational form of rural nuclei.

**Conclusions:** The defense of the territory is an aspect in which the organizations we worked with agree and are clear and assume that it is a common objective that mobilizes them, at times when extractive activities occur and can cause social and environmental damage, economic and cultural.

**Keywords:** Environmentalist, extraction, social organization, territory.

---

## Introducción

En la selva amazónica confluyen ecosistemas como el escudo guayanés —que representa el 7 % del país—, y la selva amazónica (Köppen y Geiger, 1936) —con el 42 %—, y que sumandos dan cuenta de la mitad del territorio colombiano que además cuenta con especial protección desde el establecimiento de la Ley Segunda de 1959, que originó la Reserva Forestal de la Amazonía, que ha tenido sustracciones para establecer poblaciones, para licencias de proyectos de hidrocarburos. Por otro lado, de llegar a concretarse la Sentencia 4360 del 4 de abril de 2018, que le concedió derechos al Amazonas colombiano y ordenó la creación del Pacto Intergeneracional por la Vida del Amazonas Colombiano (Pivac), sería un aporte importante para la gobernabilidad (Avalle, 2023) en la Amazonía colombiana, con la consecuente política pública para la disminución de la deforestación.

La falacia del interés colectivo se promulga desde el nivel central, y disfraza el interés corporativo (Cruz, 2014) a partir de la toma de decisiones sobre el territorio, sin conocerlo, con afectación de la autonomía y la soberanía, como está planteado desde el extractivismo minero-energético, desde el que se prodiga una generación de empleo local, especialmente en la fase de construcción y montaje de sus instalaciones. Según reportes, actividades económicas como la manufactura y la agricultura generan más empleo (Capera, 2018).

Las potencialidades de las hidroenergéticas de Colombia, para adelantar proyectos hidroeléctricos, pequeñas centrales, minicentrales, microcentrales, en Colombia, incluida la Amazonía, están en el estudio publicado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam, 2015), el cual tiene como finalidad impulsar el fortalecimiento de la interconexión eléctrica nacional y centralizar la producción de la energía.



Es común que se privilegie el sector de empresas extranjera y se observe lo económico como único factor, con total desatención por los temas sociales, lo cual provoca desigualdades ([Insulza, 2011](#)).

En 2003, se cambió la política minero-energética y se creó la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), que administra contratos y es responsable de la política petrolera en reemplazo de Ecopetrol. Igualmente, se transformó el modelo administrativo de la explotación de hidrocarburos y se crearon agencias independientes, con lo cual, el modelo minero-energético extractivista se fue confeccionando para favorecer a las empresas y un menor pago de impuestos al país.

El extractivismo forma parte de la imposición del modelo minero-energético por el Gobierno central, con el desconocimiento de los procesos territoriales, rurales y periféricos, en especial en lo concerniente a la población, la cultura, las actividades económicas, las dinámicas ecosistémicas propias para el cambio a economías que fortalezcan el buen vivir ([Di Pietro, 2018](#)).

Con estos factores mencionados, se requiere repensar con enfoques de largo plazo, con equidad y equilibrio, con el propósito de superar la visión de crecimiento económico para llegar a procesos de vida digna en el territorio, con generación energética descentralizada. En este sentido, para promover acciones en ese sentido, se plantea como objetivo de investigación comprender a las organizaciones socioambientales en la defensa del territorio, que permanentemente están en contra del extractivismo minero-energético en el departamento de Caquetá.

## Metodología

La investigación se realizó en el departamento de Caquetá, ubicado al noroeste de la región de la Amazonía colombiana; con 89 530 km<sup>2</sup>; abarca desde la cima de la cordillera Oriental hasta Chiribiquete, en la selva amazónica ([Instituto Geográfico Agustín Codazzi \[IGAC\], 2014](#)).

A través del método fenomenológico, se adelantó un manejo real y completo ([Gurdián, 2007](#)) del relato de las vivencias de las organizaciones socioambientales (OSA). Este trabajo proporciona una forma de generar conocimiento acerca de ellas en el departamento, mediante la búsqueda de la esencia constitutiva de la comprensión holística, y su rol en la defensa del territorio con la confrontación constante del sujeto con sus opiniones y creencias. La investigación se desarrolló por etapas:

- Etapa previa: para clarificar preconceptos.

- Etapa 1: evidencia de las experiencias.
- Etapa 2: estructura e identificación de temas emergentes.
- Etapa 3: reflexión.
- Etapa 4: elaboración de los temas.
- Etapa 5: los temas son agrupados.

Para analizar las categorías, estas se codificaron mediante el programa *ATLAS.Ti*, versión 9.0, para ser fiel a las respuestas suministradas por los participantes de la investigación.

## Resultados y discusión

### Organizaciones

Los hallazgos están relacionados con las organizaciones sociales que, hasta el momento, son las que buscan las soluciones en el territorio para las comunidades, debido a la histórica y permanente ausencia estatal. Estas han fungido como un gobierno que acompaña y soluciona necesidades de las comunidades. Sin embargo, en el territorio se encuentran grupos armados ilegales que hacen presencia permanente, someten a las comunidades a tratos inhumanos y desarrollan y programan sus propias actividades. En medio de estas dificultades, los habitantes son fuertes, se sobreponen, y sus organizaciones participan activamente en muchas instancias, en la búsqueda de elementos de las constituciones contemporáneas, en las que se asienta en el principio de la soberanía popular ([Aguilar, 2022](#)).

Por lo anterior, es clave, en las circunstancias del departamento de Caquetá, el fortalecimiento permanente a los procesos organizativos que promuevan la participación comunitaria amplia, en búsqueda de objetivos y metas comunes para hacer uso del sinnúmero de potencialidades, como estrategias de vida digna para las comunidades y su avance endógeno.

Se analizaron los años de presencia de las organizaciones que propenden por el cuidado del patrimonio biocultural desde una justicia social en los diferentes municipios del departamento. Entre ellas se encuentra la Vicaría del Sur-Arquidiócesis de Florencia, con accionar en Albania, Belén de los Andaquíes, San José del Fragua, Solita, Valparaíso. En el entorno amazónico, de la mano del cuidado de la casa común en sus 35 años de trabajo, ha dejado una huella profunda con los procesos de educación no formal en derechos, deberes ciudadanos y, especialmente, en participación comunitaria en espacios como las juntas de acción comunales (JAC) y los consejos territoriales de planeación (CTP).

Sin embargo, las JAC son la estructura organizativa más ampliamente difundida en Colombia. Como explicó S. T. Arruñ:

La acción comunal es una organización de cuarto grado, el primero son las juntas de acción comunal; el segundo, las ASOJUNTAS; el tercer grado es la federación, que tiene un enfoque más departamental, y el cuarto grado es la confederación a nivel nacional. (Comunicación personal, 2 de junio de 2022)

Las JAC reglamentan con la Ley 2166 del 18 de diciembre de 2021 y son organizaciones civiles sin ánimo de lucro, de participación voluntaria, con esfuerzo conjunto por un objetivo en común; se convierten en las impulsoras de cambio en las comunas, barrios, veredas, centros poblados. Se caracterizan por adelantar procesos e iniciativas de carácter local y por su cercanía con las comunidades, independientemente de los demás actores existentes en sus territorios, pues su meta es mejorar las condiciones de vida de la comunidad y trabajar por salud, vivienda, medioambiente, vías, educación, etc. (Sánchez y Prieto, 2017).

Por otra parte, los CPT responden a una necesidad de nombrar a personas cercanas o, en otros casos, a hacerse nombrar para estar siempre ahí, sin la convicción de la necesidad de actuar como un participante activo del ordenamiento del territorio que tenga propuestas en los espacios y se promueva el control social a la gestión pública en el municipio, distrito o departamento ante los consejos territoriales de planeación (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2011).

Aunque entre las encuestas no surgió el nombre de la Coordinadora de Organizaciones Sociales, Étnicas y Ambientales del Caquetá (Coordosac), hay que resaltar las iniciativas que esta lidera y lleva a cabo, desde 2010, en los municipios de San Vicente, Cartagena del Chairá, Puerto Rico, Solano, Montañita, Doncello, Paujil, San José del Fragua, Florencia. La organización tuvo origen durante el auge de la guerrilla, promovido por ideólogos de las FARC-EP, que llamaron a líderes sociales de algunos municipios de Caquetá, en 2010, que se reunieron en Putumayo. En sus inicios, contaban con recursos que usaban para pagar a los miembros de la coordinadora. En 2016, Coordosac se convirtió en promotora de los acuerdos de paz mediante pedagogías permanentes. Posteriormente, en 2018, la directiva usó los recursos en proyectos para el beneficio de las comunidades, lo que provocó que algunas organizaciones y miembros salieran de la organización.

Por otro lado, con el incremento de los asesinatos en Caquetá, Coordosac posiciona los comunicados<sup>2</sup> de derechos humanos que permanentemente se producen. Además del apoyo a

---

<sup>2</sup>Los recoge de las demás organizaciones, los publica en sus redes sociales y los lleva también a la institucionalidad respectiva)

la formación de las organizaciones y a los núcleos comunales<sup>3</sup>, y mediante el trabajo por las reivindicaciones históricas del campesinado, la organización trabaja incansablemente por la consolidación de los acuerdos de Altamira en el marco del paro nacional, durante el “estallido social” de 2021, así como en la mesa de concertación de Cartagena del Chairá — que a la fecha ha tenido avances con la intervención del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible—, y con la firma del primer acuerdo social para proteger y contener la deforestación en las selvas el 30 de octubre del 2022.

En las narrativas se encontró que los campesinos constituyen el grupo mayoritario en opiniones en los temas de participación, defensa del territorio, derechos humanos, actividades y acciones de carácter comunitario. Se observó que las JAC, motivo de las entrevistas, no presentaron muchos datos para la defensa del territorio ni para las acciones.

La organización de cabildo indígena no habló de acciones ni participación, debido posiblemente a que administrativamente tienen sus formas internas para tomar decisiones y manejar sus planes de vida.

La Vicaría del Sur Arquidiócesis de Florencia, con sus 35 años de trabajo continuo, forma parte del accionar y compromiso de las comunidades campesinas en la defensa de la vida a través de la realización de estudios sociales, técnicos y jurídicos que sustentan su posición. Igualmente, contribuye a fortalecer el conocimiento y el relacionamiento del territorio amazónico con entidades públicas, organizaciones nacionales e internacionales.

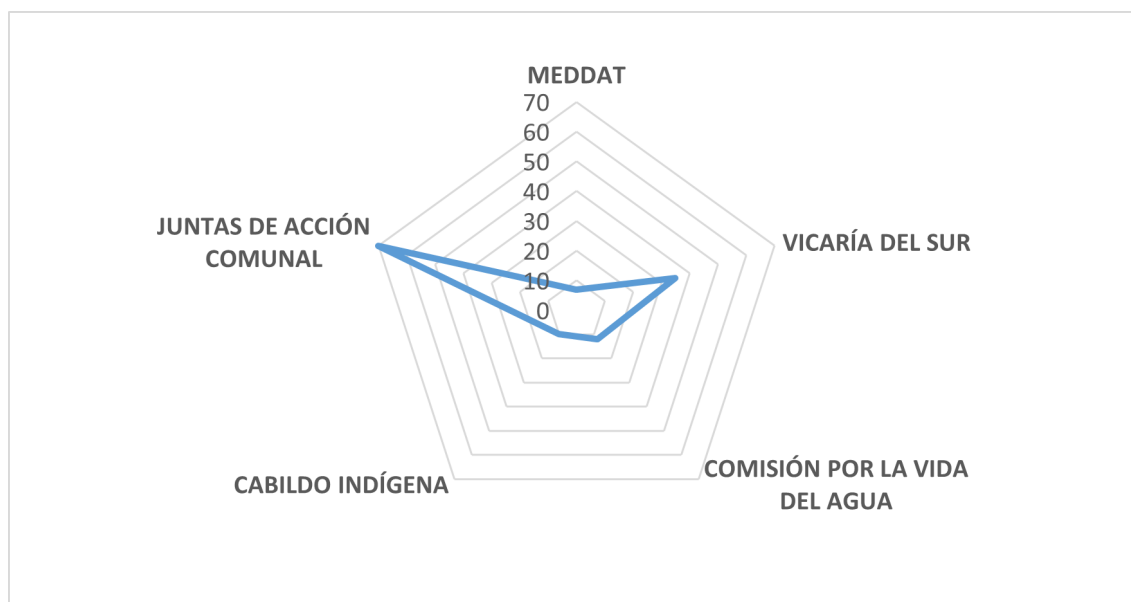
Uno de los logros de la Vicaría del Sur es la *finca amazónica*. Esta iniciativa se ejecuta en territorio como la consolidación del trabajo de familia, derechos, cuidado de la casa común, custodios de semillas, cuidado de las fuentes hídricas, arreglos agroforestales, con la promoción de buenas prácticas sociales y ambientales como herramientas formativas con énfasis en Amazonía y mecanismos de participación ciudadana ([Comisión por la Vida del Agua del Sur del Caquetá, 2018](#)) (figura 1).

## Organizaciones socioambientales

En la revisión documental se encontró que las organizaciones socioambientales adquieren un compromiso de valor teórico, como acciones de cambio en la promoción de la democracia, el arte, el pensamiento, etc., en una continua búsqueda de la presencia institucional para convertirse en el mejor método de aprendizaje de una vida buena y feliz, centrada en el amor, lo cívico

---

<sup>3</sup>Organizaciones conformadas que se consolidaron en el periodo de presencia de las FARC-EP y que hoy continúan sus procesos comunitarios.



**Figura 1.** Años de existencia de las organizaciones estudiadas

y lo político. Al inicio de una organización, es clave entender cómo se crean condiciones que faciliten la presencia de personas para generar con ellas los deseos de liderar procesos con base social que fortalezcan la inteligencia colectiva, con el entendimiento de la diversidad humana para sostener el espacio de aprendizaje con la formulación de las preguntas relevantes, permitir la autoorganización, comprender las funciones de la organización, y posibilitar los flujos de información, de recursos y comunicación efectiva (Olaizola, 2020). De esta forma, se adquiere la habilidad de responder apropiadamente a una adversidad que afecte la colectividad, y con su fomento se crean condiciones hacia una calidad de vida en el sentido del buen vivir (Dávalos, 2008).

Los conceptos de organización se cumplen en el accionar de la Mesa Departamental por la Defensa del Agua y el Territorio (MEDDAT), la cual logró posicionarse y además promovió que las comunidades en general conocieran sobre temas ambientales y sociales. Antes de la existencia de la organización, se hablaba de temas minero-energéticos en círculos muy cerrados, en actividades académicas: foros, talleres, monitoreos ambientales.

Después de los once foros realizados por MEDDAT en el territorio sobre temas minero-energéticos, se sensibilizó a la comunidad en general y es común que cualquier persona emita sus conceptos al respecto. A su vez, algunos campesinos comentan libremente sobre las marcas o mojones (sitios demarcados con presencia de petróleo por empresas en la década del sesenta) que hay en las diferentes fincas a lo largo del departamento.

### ***Mesa Departamental por la Defensa del Agua y el Territorio (MEDDAT)***

Es un espacio de integración y coordinación ciudadana a nivel departamental que agrupa personas, familias, comunidades y organizaciones, con el objetivo de fortalecer procesos de organización social, ambiental y de derechos humanos y está conformado para la búsqueda permanente de la unidad como esfuerzo ([Comisión por la Vida del Agua del Sur del Caquetá, 2018](#)).

Fue creada el 12 de noviembre del 2015 con la asistencia de 120 personas y la asamblea en pleno seleccionó a 14 personas para que hicieran las veces de dinamizadores. Según el diputado Carlos Arturo Mayorga, “en un inicio se conformaron mesas municipales por la defensa del agua y el territorio en los municipios de Puerto Rico, Solano, Milán, Paujil, Cartagena del Chairá, Florencia. En momentos de crisis se hicieron activas en el año 2016” (entrevista, 10 de julio de 2022).

Por otro lado, la MEDDAT integra redes y organizaciones nacionales: es cofundadora del Movimiento Nacional Ambiental y de la Mesa Nacional de Páramos; forma parte de la Mesa de Derechos Humanos y Empresas, del Foro Social Panamazónico, y de la Asamblea Mundial por la Amazonía. En noviembre de 2016, la Asamblea de Caquetá le dio el reconocimiento “a MEDDAT por la loable labor que vienen realizando los integrantes en el trabajo incansable por la defensa del departamento”.

Desde MEDDAT,

[esto] produjo fortalecimiento de los esfuerzos de interlocución, generación de espacios y escenarios para visibilizar, movilizar y la construcción de propuestas para el tema minero-energético del departamento del Caquetá, con el fin de impulsar iniciativas en torno a la promoción y exigibilidad de los derechos humanos y libertades fundamentales en el territorio amazónico. ([Comisión por la Vida del Agua del Sur del Caquetá, 2018, p. 46](#))

### ***Vicaría del Sur Arquidiócesis de Florencia***

Es parte activa de procesos formativos y organizativos que complementan el accionar y compromiso de las comunidades campesinas en la defensa de la vida, a través de estudios sociales, técnicos y jurídicos que sustentan su posición. Contribuye a fortalecer el conocimiento y el relacionamiento del territorio amazónico con entidades públicas, organizaciones nacionales e internacionales.

La Vicaría del Sur impulsa a las comunidades a valerse de los mecanismos jurídicos de participación comunitaria como: derechos de petición, tutela, etc. Como organización, solicitó y promovió una audiencia pública ambiental, con participación de más de 2000 personas en 2016; de igual manera, ha gestionado acuerdos municipales sobre aspectos ambientales en los municipios de Valparaíso y Morelia.

Es una organización que fortalece los mercados campesinos en los municipios de Belén de los Andaquíes, San José del Fragua, Solita, Albania, Valparaíso, Curillo. Uno de los procesos más destacados es el de los grupos de mujeres que promueven la economía del cuidado como elemento clave cuando se trabaja en el entorno amazónico, de la mano de la encíclica papal *Laudato Si'* (Francis, 2015), sumada al Sínodo por la Amazonía<sup>4</sup> y su documento final *Querida Amazonía*, en el que la organización fue un actor importante.

### ***Comisión Regional por la Vida del Agua del Sur del Caquetá***

Es una organización social y de participación ciudadana de segundo nivel que trabaja por la defensa del agua y por el territorio, con un trabajo en construcción de paz en el momento del auge de la actividad extractivista minero-energética en Caquetá. La Comisión por la Vida del Agua agrupa personas, familias, comunidades y organizaciones con objetivos e intereses en torno al fortalecimiento de procesos de la organización social. El lema “Más agua, más vida. Caquetá es Amazonía” está inspirado en el movimiento ciudadano del sur de Caquetá.

Los integrantes de esta organización de segundo orden cuentan con un plan de trabajo y celebran reuniones cada tres meses a las que asisten representantes de las comisiones municipales del sur del Caquetá de seis municipios, en las cuales se hace la proyección del trabajo regional, departamental y nacional. Esta Comisión forma parte de MEDDAT (Comisión por la Vida del Agua del Sur del Caquetá, 2018).

### ***Comisiones Municipales por la Vida del Agua***

Surgen los comisionados por la vida del agua, debido a las amenazas permanentes que se presentan en los diferentes municipios, frente a la cantidad y calidad del agua por la presencia de proyectos minero-energéticas en los municipios. Estas organizaciones están en seis municipios del departamento: Albania, Belén, San José del Fragua, Morelia, Solita, Valparaíso, y cada una cuenta con un plan de trabajo conciliado en reuniones cada dos meses (Comisión por la Vida del Agua del Sur del Caquetá, 2018).

---

<sup>4</sup>Reunión de los obispos para la región pan amazónica realizada en Roma, del 6 al 27 de octubre de 2019 (<http://secretariat.synod.va/content/sinodoamazonico/es.html>)

### ***Junta de acción comunal (JAC)***

Es la organización de base social más ampliamente difundida, con autodeterminación y conformada por presidente, vicepresidente, secretaria, vocal, fiscal, y los comités de conciliación, ambiental, de deportes, de carreteras, además de manuales de convivencia. Por otro lado, en el departamento, con reconocimiento por parte de la Gobernación, hay 352 JAC ([Gobernación del Caquetá, 2019](#)). Por su parte, Rosemary Betancourt, de la Federación de Juntas del Caquetá, manifiesta que “se han consolidado 2300 JAC” (entrevista, 29 de enero, 2023). Aunque es al Ministerio del Interior a quien le corresponde actualizar cada tres meses la información, según funciones dispuestas en el Decreto 2350 del 2003, se evidencian diferencias enormes entre una información y la otra, en cuanto a estas cifras. La Gobernación reporta las JAC que están al día con los procedimientos de la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN), algunas JAC no tienen toda la información debidamente legalizada.

### ***Cabildo indígena***

De conformidad con el Decreto 1071 de 2015, el cabildo tiene como finalidad “representar legalmente a la comunidad, ejercer la autoridad y efectuar las actividades que le atribuyen las leyes, sus usos, costumbres y el reglamento interno de cada comunidad” (art. 21). Debe tener personería jurídica, según los artículos 11 y 12 del Decreto 1088 de 1993, y el artículo 35 de la Ley 962 de 2005. El registro de la asociación o autoridad indígena se realiza ante la Dirección de Asuntos Indígenas del Ministerio del Interior. Cuando se habla de temas ambientales, los indígenas no separan; para ellos, cada acción tiene una consecuencia y cuando se desarrolla una actividad necesariamente se beneficia o se perjudica otra. Y cuando se habla de organización desde lo indígena como lo manifestó Uribe en entrevista personal que “los beneficiados siempre son los mismos y al territorio no le llegan los recursos”, la autonomía de los pueblos indígenas hace que todos los aspectos sean tratados con ellos a parte de los campesinos así estén las dos comunidades en el mismo territorio.

### **Extractivismo minero-energético**

Hay una superposición y ensamblajes en los territorios ([Sassen, 2006](#)) que no son tenidos en cuenta cuando se hace la asignación minero-energética en el país. Se presentan factores y estructuras de un modelo mixto de sustitución y promoción de importaciones con prácticas clientelistas, cuyas consecuencias son, entre otras, alto índice de desigualdad, desempleo, pobreza, conflicto social y armado, individualismo acentuado, narcotráfico, paramilitarismo, desplazamiento forzado, como se evidenció en la presidencia de Andrés Pastrana (1998-2002).

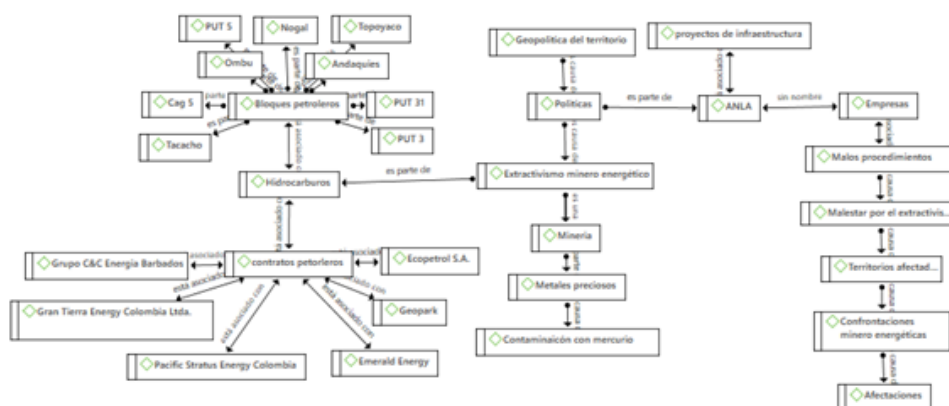


El Código de Minas de 2001 —Ley 685 de 2001— y los decretos 1163 de 1999, y 2740 de 2001 ([citados por Hernández, 2018](#)) no representaron un avance; por el contrario, se disminuyó el monto efectivo de impuesto al valor agregado (IVA) pagado aprovechable. Por ejemplo, a partir de la deducción del IVA, por compra de activos fijos, el sector minero en el país llegó a constituirse como beneficiario del 38 % del total de esas deducciones, por lo que una vez se evidenció el costo fiscal de esos beneficios, se eliminaron en la reforma tributaria de 2010. ([Carrión et al., 2018](#)).

En cuanto a minería para Caquetá, a 2017 58 títulos mineros vigentes que representan un área de 3963 hectáreas ([Agencia Nacional de Minería, 2017](#)). Esto es producto de un sistema en el que, a nivel central, las decisiones globales entre ministerios, agencias de hidrocarburos y mineras definen el rumbo político. En este contexto, diversas coaliciones entre el Estado y las empresas se desarrollaron a principios de los años 2000, lo cual generó un subsistema denominado Gobierno-industria con una alianza estatal administrativa, a partir de la cual la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), el Ministerio de Minas y Energía, la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), la Comisión Quinta del Senado y la Comisión del Gasto Público ejercían la potestad de administrar el recurso y la rentabilidad de los hidrocarburos con la seguridad que requerían los inversionistas en el área de influencia de los proyectos con batallones minero-energéticos situados estratégicamente, apoyándose en la política de Seguridad Democrática del gobierno de Álvaro Uribe Vélez ([Hernández, 2018](#)). En palabras de Miguel Latorre, un joven habitante del territorio, “los países europeos practican con sus colonias como el caso del Congo Belga, el inglés en Uganda, Italia en Libia” (entrevista, 12 de enero, 2022). Para el caso de Caquetá, en la figura 2 se ilustra el mapa conceptual que recoge consideraciones para hablar de extractivismo minero-energético, logrado mediante las narrativas de las personas que colaboraron en la investigación.

El avance de la locomotora minero-energética en Caquetá se evidencia en el hecho de que todos los municipios del departamento tienen bloques petroleros asignados: en las cuencas del Caguán y el Putumayo (43 bloques petroleros), y en el valle superior del Magdalena (un bloque petrolero). Actualmente existen siete contratos vigentes y ocho han sido suspendidos. Se adelantó la liquidación de un contrato, y se definieron tres áreas de interés por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) en jurisdicción del departamento de Caquetá para ser ofertadas en el marco del Proceso Permanente de Asignación de Áreas, segundo semestre de 2019 ([ANH, s. f.](#)).

En Caquetá, la gran minería se plantea como un generador de empleo local, especialmente en la fase de construcción y montaje de sus instalaciones; sin embargo, comparada con las demás actividades económicas —manufactura, agricultura—, dista de serlo. El sector minero (petróleo y minas) generó empleo para 195 trabajadores en 2016 ([Pardo, 2017](#)), las grandes em-



**Figura 2.** Mapa conceptual respecto al extractivismo minero-energético en el departamento de Caquetá

presas y sus gremios señalan que el empleo directo e indirecto de la minería (carbón, oro y níquel) supera los dos millones de trabajadores, pero no aportan estudios que permitan verificar las cifras; por consiguiente, no pasan de ser opiniones.

Los grandes generadores de empleo en Colombia son los sectores de comercio, servicios comunales, agricultura e industria. Muchas de las entidades que el Ministerio de Minas y Energía señala como fiscalizadoras directas o indirectas de la actividad minera lo hacen mediante visitas, una o dos veces al año. Las entidades fiscalizadoras no cruzan información sobre los fiscalizados, y los entes de control realizan auditorías especiales que han llevado incluso a encontrar graves irregularidades, sobre todo con las regalías que, sin embargo, habían pasado inadvertidas para la autoridad minera. Los resultados de una auditoría reciente por la Contraloría General de la República a la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) evidencian que esta entidad no está en capacidad de hacer seguimiento a las licencias ambientales de los grandes proyectos del país, de manera que en Colombia no se hace fiscalización a las grandes compañías mineras, como debería hacerse. Se confunde una visita con una gestión fiscalizadora y, además, las comisiones que se crean para ello basadas en la información que provee la empresa objeto de fiscalización (Pardo, 2017).

La política pública está diseñada para el favorecimiento económico del sector empresarial minero, como es el caso del Conpes 3154 (DNP, 2002). En estos documentos es claro que el factor económico es el único que se tiene en cuenta, y el cual supone desatención a los aspectos sociales y ambientales claves para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) al 2030.

La imposición del modelo minero-energético, por parte del Gobierno central con el desconocimiento de las situaciones territoriales, hace que la población, la cultura, las actividades económicas, las dinámicas ecosistémicas propias se vean perturbadas. En algunos casos se produce superposición de territorios que no son tenidos en cuenta cuando se hace la asignación minero-energética en el país. Se conocen las áreas asignadas por parte de la ANH, a la Agencia Nacional de Minería (ANM) y se licencian por parte de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA); sería conveniente hacer revisiones de estas asignaciones y negocios del Gobierno con empresas minero-energéticas, a la luz de la Sentencia 4360 que le concede derechos al Amazonas colombiano ([Corte Suprema de Justicia, 2018](#)), con el actual esfuerzo por preservar y recuperar la Amazonía. Se puede recurrir a la normativa nacional e internacional en lo que respecta al cambio climático, a la generación de gases efecto invernadero y a los agentes mineros y petroleros como causas directas de la deforestación.

También, hay estudios acerca de las potencialidades de pequeñas centrales hidroeléctricas, minicentrales hidroeléctricas, microcentrales hidroeléctricas, para Colombia, incluida la Amazonía ([Ideam, 2015](#)). Por esto, hay una enorme preocupación por el posible ecodidio que se pueda suceder en los ríos que serían afectados por esos proyectos. En este sentido, se encuentran proyectos de hidroeléctricas para los ríos Guayas, San Pedro, Orteguaza, Hacha, Fragua, en el departamento de Caquetá, y los ríos Caquetá, Mocoa y Pepino, en Putumayo, con posibilidades de construcción de hidroeléctricas y pequeñas centrales hidroeléctricas.

## Retos

El conocimiento del territorio inicia con el acercamiento a las formas organizadas que se presentan, en un primer plano está la generación de confianza. Una vez generada, se facilitaría el trabajo conjunto de las organizaciones con la institucionalidad en el camino hacia una intervención favorable y sin conflictos, debido a que las formas organizativas tienen un recorrido y un conocimiento más depurado de los acontecimientos en los municipios.

Para abordar lo ambiental, surgen las organizaciones, y cuando estas trabajan de la mano de las comunidades y están inmersas en temas ambientales se denominan organizaciones socioambientales. Las formas organizativas constitucionales están explícitas en el artículo 340 de la Constitución Nacional, que reglamenta el Consejo Nacional de Planeación y tiene un representante del sector ambiental. Ahí se puede plantear un trabajo desde las organizaciones socioambientales para que se trabaje la participación desde las decisiones del ordenamiento del territorio, para que se proteja de intereses mercantilistas, y sean las comunidades las que tengan la primera opción y ejerzan su derecho a estar y a proyectar su vida y la de sus familias, donde habitan.

Aunque es clave también entender que a nivel organizativo hay deficiencias en la articulación regional y nacional, con poca presencia de capacidades locales para la gestión y la ausencia de redes efectivas ([Calderón, 2007](#)), que permitan un accionar pleno de las organizaciones, se requiere que a los territorios llegue una educación para aprender a conocer, aprender a hacer, aprender a vivir juntos, aprender a ser ([Delors, 1994](#)), a actuar en democracia permanente con niveles de exigencia hacia quienes eligen para que los representen.

Es clave construir responsabilidad socioambiental desde una propuesta ecocrítica, que fortalezca la conciencia ambiental a partir de reflexiones generadas con base en narrativas ([Hernández y Ortiz, 2017](#)), acompañadas de diseños y estrategias de planificación para la gestión de acuerdos, y así buscar soluciones a los conflictos identificados.

Se ha constatado que no se trata de ensayar más formas fallidas de desarrollos alternativos, sino de buscar verdaderas alternativas al desarrollo como principios organizadores de la visión, posicionamiento e intervención sobre la realidad para el desarrollo endógeno de los territorios de la Amazonía, que representa el 49,8 % del territorio nacional con 1 264 702 habitantes, según el último censo del Departamento Administrativo Nacional de Estadística ([DANE](#)) (2018).

La dispersión de la población es uno de los inconvenientes para la presencia institucional permanente; allí las organizaciones sociales y socioambientales que están presentes en el territorio desempeñan un papel importante en este momento de cambio en el que se encuentra Colombia y específicamente la Amazonía.

Se encuentran diversas articulaciones con las tecnologías que han ido transformando las experiencias y repertorios para la organización y la acción colectiva en general dando lugar a potenciales y nuevos repertorios, acciones y formas de interrelación.

## Conclusiones

Las organizaciones sociales, debido a su accionar frente a los temas sociales y ambientales del departamento de Caquetá, se convirtieron en socioambientales, a las cuales les corresponde enfrentar los conflictos socioterritoriales que se presentan en las comunidades como denuncias de todo tipo, actividades relacionadas con derechos humanos, afectaciones ambientales, afectaciones sociales y conflictos en general.

Los movimientos sociales utilizan varias estrategias como la orientación jurídica, la incidencia política y la movilización social, debido a la falta de presencia institucional y de un sistema nacional que anticipe los posibles conflictos ambientales y que diseñe políticas públicas para

evitarlos y solucionarlos.

Es evidente la impunidad y la inercia institucional a la que se ven enfrentadas las organizaciones cuando realizan protestas en contra de los proyectos extractivos de empresas multinacionales y nacionales de gran tamaño, lo cual se agrava por el hecho de que son las comunidades y su territorio los que sufren las consecuencias, los efectos de estos proyectos. Las corporaciones autónomas regionales, las secretarías de Ambiente y las alcaldías están enteradas de todos los proyectos minero-energéticos que se desarrollan en sus territorios, y no hay una entidad que se encargue de gestionar y desarrollar procesos preventivos en los cuales puedan ampararse las comunidades. Además, la institucionalidad, en especial la relacionada con el Sistema Nacional Ambiental (SINA), debería promover el diálogo entre las OSA.

Adicionalmente, la institucionalidad gubernamental, integrada las direcciones de gestión del riesgo, las corporaciones y las organizaciones, puede promover acciones permanentes para el manejo de alternativas socioambientales en los territorios, de cara al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en 2030, mediante la incorporación de la Amazonía como sujeto de derechos.

Es necesario el acercamiento con los principios de las organizaciones como la participación, la igualdad, la equidad de género, el pluralismo, la solidaridad, la democracia, la transparencia, el control social y la coordinación, para enfrentar los impactos ambientales que preocupan a las comunidades y organizaciones del territorio.

Por otro lado, las múltiples culturas son claves para influir en las formas de cuidar, mantener, restaurar y hacer propuestas para proveer un entorno social de buen vivir que permita la búsqueda de reivindicaciones sociales.

Los procesos de investigación territoriales locales son claves para acercarse a posibles respuestas de los conflictos, con propuestas propias. La conservación y regeneración de la Amazonía es la meta para todos y, en especial, para las organizaciones locales.

La defensa del territorio es el objetivo común de las diferentes organizaciones; por ello, se movilizan cuando hay actividades extractivas que puedan causar afectaciones a su forma de vivir y de relacionarse con el entorno natural.

## Financiación

El presente trabajo formó parte de la investigación en participación de organizaciones socioambientales que defienden el territorio del extractivismo minero-energético en el departamento

de Caquetá, y es parte de mi formación como doctora en Educación y Cultura Ambiental de la Universidad de la Amazonia.

## Referencias

- Agencia Nacional de Minería. (2017). *Caracterización de la actividad minera departamental. Caquetá*. [https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/bullets\\_caqueta\\_01-06-2017.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/bullets_caqueta_01-06-2017.pdf)
- Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). (s. f.). *Áreas. Segundo semestre 2019*. [https://anh.gov.co/documents/1486/Informe\\_de\\_gesti%C3%B3n\\_2019.pdf](https://anh.gov.co/documents/1486/Informe_de_gesti%C3%B3n_2019.pdf)
- Aguilar, M. J. (2022). Participación comunitaria en salud: balance crítico sobre los consejos de salud y otras experiencias participativas en Atención Primaria. *Comunidad*. <https://comunidad.semfyc.es/article/participacion-comunitaria-en-salud-balance-critico-sobre-los-consejos-de-salud-y-otras-experiencias-participativas-en-atencion-primaria-25>
- Avalle, G. (2023). Gobernabilidad y gobernanza. Enfoques en tensión. *Estudios Políticos*, (66), 28-47. <https://doi.org/10.17533/udea.espo.n66a02>
- Calderón, N. (2007). *Construyendo Agenda 21 para el departamento de Caquetá*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (Sinchi).
- Capera, F. J. (2018). Modelo minero-energético destruyendo naturaleza y sociedad. *Espacio Abierto*, 27(1), 245-249. <https://www.redalyc.org/journal/122/12260455009/html/>
- Carrión, T. N., Arévalo, J. C., y Bermúdez, S. L. (2018). *Comparativo del impuesto al valor agregado en los bienes de capital en el sector minero en Colombia y Perú*. [Tesis de especialización] Universidad Jorge Tadeo Lozano. <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20.500.12010/8329>
- Comisión por la Vida del Agua del Sur del Caquetá. (2018). *Más agua, más vida. Caquetá es Amazonía*. Vicaría del Sagrado Corazón de Jesús, Vicaría del Sur, Diócesis de Florencia.
- Congreso de la República de Colombia. (8 de julio de 2005). Ley 962 de 2005. "Por la cual se dictan disposiciones sobre racionalización de trámites y procedimientos administrativos de los organismos y entidades del Estado y de los particulares que ejercen funciones públicas o prestan servicios públicos". <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=17004>

- Corte Suprema de Justicia. Sala de Casación Civil. (5 de abril de 2018). *Sentencia STC4360-2018. Magistrado ponente Luis Armando Tolosa Villabona*. <https://cortesuprema.gov.co/corte/wp-content/uploads/2018/04/STC4360-2018-2018-00319-011.pdf>
- Cruz, C. (2014). Coyuntura Económica Nacional. *Revista Economicus Heterodoxus*, (2), 12-16. <https://www.unipiloto.edu.co/wp-content/uploads/2013/11/Economicus-Heterodoxus-No2-2014.pdf>
- DANE (2018) *Censo Nacional de población y Vivienda*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>
- Dávalos, P. (5 de agosto de 2008). *Reflexiones sobre el sumak kawsay (el buen vivir) y las teorías del desarrollo*. <https://red.pucp.edu.pe/ridei/wp-content/uploads/biblioteca/100602.pdf>
- Delors, J. (1994). Los cuatro pilares de la educación. En J. Delors, I. Al Mufti, I. Amagi, R. Carneiro, F. Chung, B. Geremek, W. Gorham, A. Kornhauser, M. manley, M. Padrón Quero, M. A. Savané, K. Singh, R. Stavenhagen, M. Won Suhr, y Z. Nanzhao (dir.), *La educación encierra un tesoro. Informe a la Unesco de la Comisión Internacional sobre la educación para el siglo XXI* (pp. 91-103). Correo de la Unesco.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2002). *Documento Conpes 3154. Modificación al Conpes 2878 del 16 de octubre de 1996, referente a la industria petroquímica*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3154.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2011). *El papel de los Consejos Territoriales de Planeación (CTP). Guía para autoridades territoriales y ciudadanía*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Consejo%20Nacional%20de%20Planeacin/Guia%20Consejos%20Territoriales%20web.pdf>
- Di Pietro, S. (2018). Energía y buen vivir: alternativas de producción descentralizada de la energía. *Revista Vía Iuris*, 24, 151-166. <https://doi.org/10.37511/viaiuris.n24a8>
- Francis. (2015). *Laudato si': Encyclical letter*. Vatican Press. [https://www.vatican.va/content/francesco/en/encyclicals/documents/papa-francesco\\_20150524\\_enciclica-laudato-si.html](https://www.vatican.va/content/francesco/en/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si.html)
- Gobernación del Caquetá. (29 de noviembre de 2020). *Listado de juntas de acción comunal inscritas BAC-2019, departamento del Caquetá*. <https://www.caqueta.gov.co/datos-abiertos/listado-de-juntas-de-accion-comunal-inscritas-bac-2019>

- Gurdián, A. (2007). *El paradigma cualitativo en la investigación socioeducativa*. Coordinación Educativa y Cultural Centroamericana (CECC), Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI).
- Hernández, R. L. (2018). *Coaliciones promotoras y cambios en la política petrolera colombiana: 1905-2005*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Hernández, C. J. y Ortiz, O. L. (octubre de 2017). *La construcción de responsabilidad socioambiental, a través de la ecocrítica, en estudiantes de ciclos IV y V de los colegios distritales Charry y Nueva Colombia*. Universidad de la Sabana. <https://repositorios.educacionbogota.edu.co/handle/001/2714>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2015). *Atlas del potencial hidroenergético de Colombia*. <https://tiendavirtual.igac.gov.co/es/content/atlas-del-potencial-hidroenerg%C3%A9tico-de-colombia#:~:text=Es%20una%20gu%C3%ADa%20que%20aporta,A%C3%B1o:%202015>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2014). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento de Caquetá. Escala 1:100 000*. <https://tiendavirtual.igac.gov.co/es/content/estudio-general-de-suelos-y-zonificacion-de-tierras-departamento-de-caqueta>
- Insulza, J. M. (2011). Introducción. Desigualdad, democracia e inclusión social. En H. de Zela, P. Esquenazi, Á. Briones y G. Ochoa (eds.), *Desigualdad e inclusión social en las Américas* (pp. 13-34). Organización de los Estados Americanos (OEA). <https://www.oas.org/docs/desigualdad/libro-desigualdad.pdf>
- Köppen, W., y Geiger, G. (1936). *Handbuch der klimatologie in 5 Bänden*. Gebruder Borntraeger. [http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen\\_1936.pdf](http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen_1936.pdf)
- Olaizola, E. (2020). *Liderazgo biomimético para las organizaciones del siglo XXI* [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). <https://www.tesisenred.net/handle/10803/670268#page=1>
- Pardo, B, L. A. (2017). *Extractivismo, derechos y tributación: cooptación del Estado colombiano Un caso de estudio Ideas verdes*. Fundación Heinrich Böll Stiftung Bogotá. [https://co.boell.org/sites/default/files/20181003\\_ideas\\_verdes\\_11\\_web.pdf](https://co.boell.org/sites/default/files/20181003_ideas_verdes_11_web.pdf)
- Presidencia de la República de Colombia. (10 de junio de 1993). Decreto 1088 de 1993. “Por el cual se regula la creación de las asociaciones de Cabildos y/o Autoridades Tradicionales Indígenas”. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1501>



- Presidencia de la República de Colombia. (26 de mayo de 2015). *Decreto 1071 de 2015. "Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo Agropecuario, Pesquero y de Desarrollo Rural"*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=76838>
- Sánchez Castañeda, J. M., y Prieto, A. V. (2017). Incidencia de las juntas de acción comunal en el desarrollo local en áreas de influencia de proyectos de hidrocarburos. *Equidad y Desarrollo*, (27), 195-212. <https://doi.org/10.19052/ed.3997>
- Sassen, S. (2006). Hacia una proliferación de ensamblajes especializados de territorio, autoridad y derechos. *Cuadernos del Cende*, 23(62), 95-112. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40306206>



## Requerimientos técnicos de la digitalización de subestaciones eléctricas por etapas y sus pruebas para la puesta en marcha

### Technical requirements for digitisation of electrical substations in stages and their testing for application march

Juan Camilo Bolaños Espín <sup>1</sup>, Francisco Julián Pereira Otero <sup>2</sup> y Eduardo Gómez-Luna <sup>3</sup>

Fecha de Recepción: 18 de Abril de 2024

Fecha de Aceptación: 16 de agosto de 2024

**Cómo citar:** Bolaños Espín J. C., Pereira Otero, F. J., y Gómez-Luna E. (2024). Requerimientos técnicos para la digitalización de subestaciones eléctricas por etapas y sus pruebas para la puesta en marcha. *Tecnura*, 28(81), 86-105. <https://doi.org/10.14483/22487638.22075>

## Resumen


**Objetivo:** identificar los requerimientos técnicos para la implementación de subestaciones eléctricas digitales y sus pruebas para la puesta en marcha.


**Metodología:** se realizó un estudio exhaustivo para identificar los requisitos técnicos mínimos para la implementación exitosa de subestaciones eléctricas digitales. En primer lugar, se determinó la cantidad de etapas para la migración hacia una subestación digital. En segundo lugar, se identificaron las pruebas de fábrica (Factory Acceptance Test, FAT, en inglés) como un componente esencial que garantiza el correcto funcionamiento de los equipos y sistemas involucrados.

**Resultados:** se identificaron los requisitos mínimos para la implementación de subestaciones eléctricas digitales, a través de tres etapas, cada una de las cuales supone el uso de equipos y materiales que deben ser sometidos a las FAT para garantizar su correcto funcionamiento. Además, se determinó el *software* adecuado para cada prueba. Todo el proceso se realizó en cumplimiento de estándares internacionales, entre ellos la norma IEC 61850 y la NTC 61869-9.

**Conclusiones:** la digitalización de subestaciones eléctricas ha demostrado mejoras significativas en la eficiencia, seguridad y calidad del servicio de energía eléctrica. Este estudio ha delineado los requerimientos para alcanzar subestaciones completamente digitales, definiendo cada una de las etapas para su implementación. Además, la inclusión de FAT, como una parte del proceso, asegura que los equipos y sistemas funcionen correctamente y cumplan con los estándares establecidos antes de su puesta en marcha. Los hallazgos proporcionan una base sólida para que los operadores de red guíen su transición hacia subestaciones eléctricas digitales, como contribución a una infraestructura energética más eficiente, segura y confiable.

<sup>1</sup>Ingeniero electricista. Universidad del Valle. Cali, Colombia . Email: [juan.espin@correounivalle.edu.co](mailto:juan.espin@correounivalle.edu.co)

<sup>2</sup>Ingeniero electricista. Universidad del Valle. Cali, Colombia . Email: [francisco.pereira@correounivalle.edu.co](mailto:francisco.pereira@correounivalle.edu.co)

<sup>3</sup>Ingeniero electricista, doctor en Ingeniería. Universidad del Valle. Cali, Colombia . Email: [eduardo.gomez@correounivalle.edu.co](mailto:eduardo.gomez@correounivalle.edu.co)

---

**Palabras clave:** subestación eléctrica, sistemas de potencia, automatización, interoperabilidad, ciberseguridad.

---

## Abstract

**Objective:** Identify each of the technical requirements necessary for the implementation of digital electrical substations and their tests for commissioning.

**Methodology:** A comprehensive study was carried out to identify the minimum technical requirements necessary for the successful implementation of digital electrical substations. First, the number of stages required for the migration process to a digital substation was determined. Second, we identified factory testing (FAT) as an essential part of the process, guaranteeing the correct functioning of the equipment and systems involved. Third, the necessary technical requirements for the implementation of digital electrical substations were determined.

**Results:** This research demonstrates that the implementation of digital electrical substations requires overcoming three stages, each of them with the need for specific equipment and materials that must be tested to guarantee their correct operation. It was identified which type of software is the most suitable for this type of testing. The entire process is carried out in compliance with international standards, such as IEC 61850 and NTC 61869-9.

**Conclusions:** The digitalization of electrical substations has demonstrated significant improvements in the efficiency, safety and quality of electrical energy service. This study has outlined the minimum requirements necessary to achieve completely digital substations, defining each of the stages for its implementation. Additionally, the inclusion of Factory Acceptance Testing (FAT), as a fundamental part of the process, ensures that equipment and systems function correctly and meet established standards before commissioning. The findings of this study provide a solid foundation for grid operators to guide their transition towards digital electrical substations, contributing to a more efficient, secure and reliable energy infrastructure.

**Keywords:** Station bus, Process bus, Factory Acceptance Test (FAT), Conventional Electrical Substation (SEC), Digital Electrical Substation (SED), Digital Secondary System (SSD), Electrical infrastructure, Information technologies, Control systems, Electrical energy, Automation, Interoperability, Cybersecurity.

---

## Introducción

En el contexto de la transición energética global, la digitalización es clave para el avance del sector. En este artículo se analiza la migración hacia las subestaciones eléctricas digitales (SED), desarrollada en tres etapas que representan una transformación de lo convencional a lo digital en la adquisición, procesamiento, transmisión y salida de datos. Debido al incremento en la demanda de energía eléctrica, los sistemas eléctricos de potencia están experimentando un crecimiento continuo, lo que requiere el desarrollo de redes más inteligentes, confiables y seguras (IEEE Xplore, 2012, 2017; Ministerio de Minas y Energía [MinMinas], 2013). Este cambio supone desafíos técnicos, como la infraestructura necesaria y la capacitación del personal, pero también ofrece oportunidades para mejorar la confiabilidad, flexibilidad y calidad del servicio eléctrico (Raman y Suresh, 2022). Un aspecto crítico es la realización de pruebas de aceptación en fábrica (*factory acceptance testing* [FAT]), fundamentales para validar el funcionamiento de los equipos, garantizar la interoperabilidad, ciberseguridad y la capacidad de monitoreo en

tiempo real. Vale la pena señalar que, en la actualidad, no se menciona una normativa específica para la implementación de SED. No obstante, existen normas internacionales que orientan y estandarizan aspectos clave relacionados con la interoperabilidad entre equipos y protocolos de comunicación en sistemas eléctricos. Entre ellas se destacan la IEC 61850 y la NTC 61869-9 ([Comité Chileno del Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas \[Cigre\], 2020](#)).

También, en este artículo se detallan las diferentes etapas para lograr una subestación completamente digital: desde la fase inicial de digitalización hasta la implementación de sistemas avanzados de gestión y análisis de datos en tiempo real. Esto también incluye la selección y configuración de equipos y sistemas, la integración de tecnologías emergentes como el internet de las cosas (IoT, por su sigla en inglés) y la implementación de protocolos de comunicación seguros y eficientes. Con el fin de cumplir el objetivo propuesto, el estudio se organizó como se describe a continuación: en “Metodología” se explica la SED junto a los estándares de la IEC adoptados para *bus de proceso*, *bus de estación* y los protocolos de comunicación; en la sección “Niveles de la SED y sus etapas de digitalización” se explican estos elementos junto con el *sistema secundario digital* (SSD); y en “Pruebas FAT de SED” se exponen los requerimientos técnicos de las FAT para la implementación de SED. Estas subestaciones representan una evolución significativa en la infraestructura eléctrica, al integrar tecnologías avanzadas de automatización, control y comunicación para mejorar la eficiencia, confiabilidad y seguridad de la red eléctrica. Como se observa en la figura 1, la SED cuenta con una jerarquía que inicia con comunicación por *bus de proceso* al nivel de bahía, donde se encuentran los dispositivos electrónicos inteligentes (*intelligent electronic devices* [IED]) con comunicación por *bus de estación* al nivel de estación, donde se encuentra el sistema de automatización de subestación (*substation automation system* [SAS]) y la interfaz humano-máquina (*human-machine interface* [HMI]); por último, se identifica el nivel SCADA principal ([Eslava et al., 2015](#)).

## Metodología

Las SED se digitalizan mediante un enfoque gradual que abarca niveles de equipo, bahía y estación, para así mejorar la eficiencia, confiabilidad y seguridad de la infraestructura. Se implementan tecnologías avanzadas y protocolos de comunicación que permiten la interacción entre dispositivos y la recopilación de datos en tiempo real ([Huang, 2017](#); [Altaher, 2021](#)). Este proceso, que comienza con módulos clave para establecer la interoperabilidad, busca optimizar la gestión del flujo de energía y adaptarse a las crecientes demandas del sector, lo cual asegura una transición efectiva hacia un sistema completamente digital. A continuación se detallan los niveles de una SED y etapas para su digitalización.



Figura 1. Subestación eléctrica digital

Nota: tomado de [SRGwIN \(2021\)](#).

## Niveles de la SED y sus etapas de digitalización

### *Nivel de equipo*

En las subestaciones eléctricas digitales, el nivel de equipo es crucial para la gestión y control eficiente del flujo de energía eléctrica, lo cual garantiza una operación segura y confiable. Este nivel incluye equipos de potencia como transformadores, interruptores, dispositivos de protección y control, capacitores y reactores, cada uno con funciones específicas en la regulación, distribución y protección de la energía eléctrica ([Arias Giraldo, 2020](#); [Toscano Palacios, 2010](#)).

La digitalización en el nivel de equipo ha transformado la modernización de las subestaciones eléctricas, y ha mejorado la precisión en la medición, control y protección de los equipos y la red. El uso de tecnologías como los transformadores de instrumentación no convencionales (NCIT) y las *merging units* (MU) favorece la integración de dispositivos y la estandarización de la comunicación ([Aldana de León, 2007](#); [García, 2022](#)).

El protocolo *samples values* (SV), conforme al estándar IEC 61850-9-2 *bus de proceso*, establece la conexión en las SED. Esta capa de comunicación digital habilita la interacción entre el nivel de equipo y el de bahía, además de la recopilación de datos en tiempo real. Esto optimiza la supervisión del estado de la red, la toma de decisiones críticas y la respuesta proactiva ante

situaciones de emergencia ([Crossley et al., 2011](#); [Gutiérrez Salazar, 2020](#)). La comunicación eficiente entre los equipos primarios y el nivel de bahía se logra por medio del protocolo SV, que facilita la transmisión en tiempo real de muestras de corriente y voltaje desde los sensores del nivel de equipo hacia los dispositivos de protección y control en el nivel de bahía.

### ***Nivel de bahía***

El nivel de bahía en las SED alberga los paneles de protección, control, medición y monitoreo que garantizan el funcionamiento óptimo de los equipos, dentro del cuarto de control local. También, se encuentran dispositivos como *gateways*, *routers*, GPS, teleprotecciones, RTU, entre otros, los cuales permiten la comunicación y la coordinación de los equipos dentro de este nivel ([Torres y Venegas, 2001](#); [Barón Martínez, 2017](#); [Jaramillo Lozano, 2020](#)). Se implementa el sistema de automatización de subestaciones (SAS) para supervisar y controlar el estado de los componentes y del sistema en su conjunto. La comunicación basada en *ethernet* es una parte integral de esta infraestructura, al reemplazar el cableado convencional punto a punto y al aumentar la velocidad de transmisión de datos en tiempo real ([Jaramillo Lozano, 2020](#); [Radoglou-Grammatikis et al., 2019](#)). Igualmente, en este nivel, la estandarización ofrece mayor flexibilidad, confiabilidad y eficiencia; aumenta la interoperabilidad entre los niveles de la subestación, lo cual contribuye a una operación más coordinada y segura.

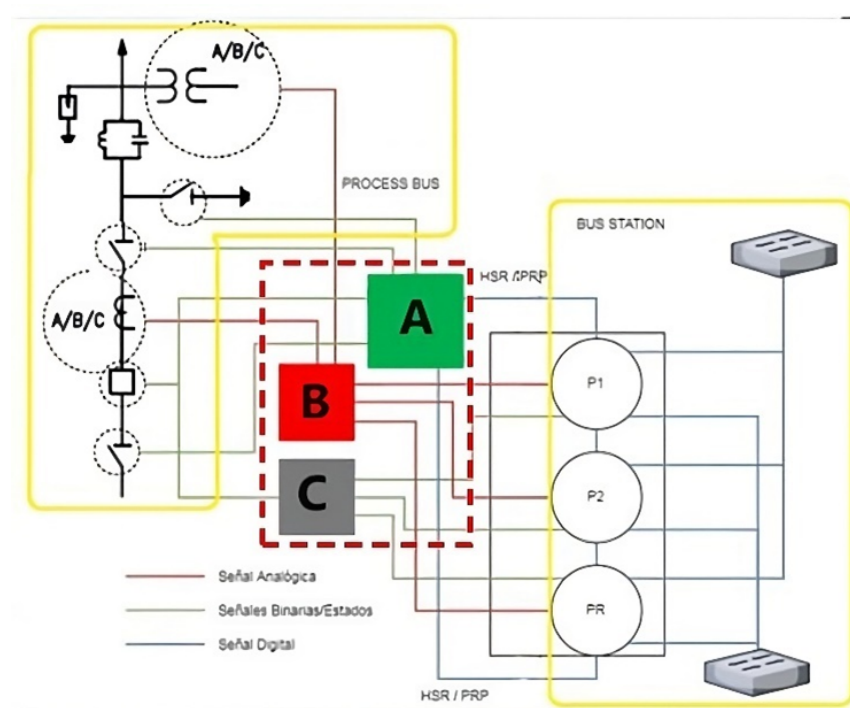
### ***Nivel de estación***

El nivel de estación en las SED actúa como la interfaz entre la subestación y el centro de control; esto facilita la supervisión y el control remoto de la infraestructura eléctrica, mediante dispositivos y sistemas de gestión local desde una caseta de control. La interfaz hombre-máquina (human-machine interface [HMI]) proporciona acceso a información crítica, como mediciones de variables eléctricas (tensión, corriente, potencia), estados operativos de los equipos y alarmas. En este nivel, se utilizan protocolos de comunicación estandarizados, como el *manufacturing message specification* (MMS) y el *generic object-oriented substation event* (GOOSE) ([Rangelov et al., 2016](#); [Claveria y Kalam, 2020](#)), conforme al estándar IEC 61850-8-1, el cual es fundamental para la interoperabilidad de dispositivos; para así facilitar la automatización de procesos y optimizar la operación de la subestación. Esto reduce los tiempos de respuesta ante contingencias y mejora la resiliencia del sistema eléctrico. También se implementa el protocolo GOOSE, basado en *ethernet*, para la transmisión rápida de mensajes entre dispositivos; mientras que MMS, basado en TCP/IP, facilita el intercambio de información compleja y la supervisión de subestaciones. Las etapas de digitalización en las SED representan un proceso gradual de modernización y adopción de tecnologías digitales, orientado a mejorar la eficiencia, confiabilidad y seguridad de la infraestructura eléctrica, lo cual contribuye la transición a un sistema más inteligente y resiliente.

### *Etapa 1*

En la migración hacia subestaciones eléctricas digitales, la etapa inicial se centra en tres módulos. El *módulo A*, clave para la integración de sistemas de protección y control, utiliza señales análogas, binarias y digitales que se transmiten desde el *bus de proceso* hasta el *bus de estación*. Su implementación asegura la interoperabilidad de los equipos y optimiza la respuesta ante condiciones operativas cambiantes; así, optimiza la confiabilidad y seguridad del sistema eléctrico (Schweitzer Engineering Laboratories, s. f.). El *módulo B* tiene a cargo la medición de variables eléctricas mediante entradas y salidas de señales análogas, lo que proporciona una plataforma confiable para la recopilación precisa de datos. Este módulo posibilita el monitoreo continuo de parámetros eléctricos en tiempo real, como voltaje, corriente y potencia.

Por último, el *módulo C* gestiona interrupciones, además de administrar entradas y salidas de señales binarias. Este módulo es crucial para asegurar una respuesta eficiente y precisa en el control de la subestación, ya que posibilita la detección y respuesta rápida ante fallos o anomalías en el sistema, esta etapa se ilustra en la figura 2.



**Figura 2.** Etapa 1 de la digitalización

## Etapa 2

En el módulo A se integran tecnologías avanzadas, como IED y sistemas de comunicación basados en *ethernet*. Esta integración consolida funciones críticas, como los disparos de los interruptores, el control y la protección de la infraestructura eléctrica, lo que resulta en la eliminación del módulo C.

El enfoque en esta etapa está orientado a mejorar la supervisión y el control de la subestación, aumentando la gestión eficiente de los recursos eléctricos. La conversión de señales binarias en señales completamente digitales hasta el *bus de estación* logra la adquisición de datos en tiempo real, y proporciona a los operadores de red información precisa y actualizada. Este cambio optimiza la respuesta ante situaciones operativas e incrementa la capacidad de análisis y diagnóstico del sistema; así, contribuye a una operación más segura y confiable dentro de la subestación, como se ilustra en la figura 3.

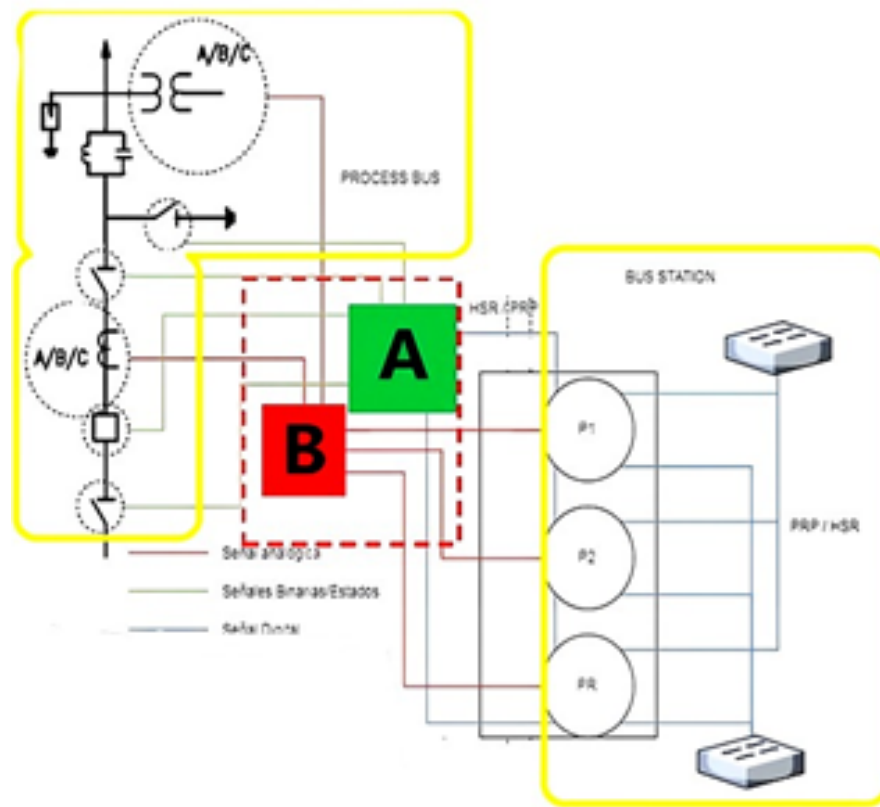
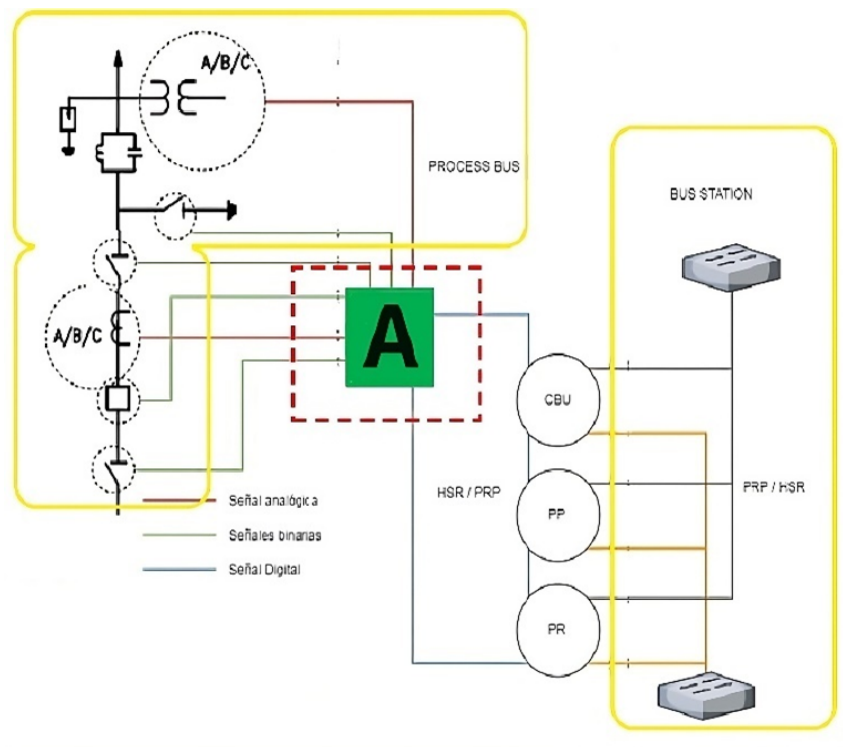


Figura 3. Etapa 2 de la digitalización



### *Etapa 3*

En la etapa 3 se tiene el módulo A que combina funciones de los *módulos B y C*, explicados anteriormente. Además, se garantiza un flujo eléctrico seguro y eficiente mediante la implementación de funciones avanzadas de monitoreo y control, se realiza una integración más avanzada al incorporar dispositivos que capturan simultáneamente señales analógicas de medición y señales binarias de protección; esto supone la eliminación del módulo B y simplifica la arquitectura del sistema al conservar únicamente el módulo A. Esta combinación representa un avance significativo hacia la modernización de la subestación y mejora el rendimiento de la infraestructura eléctrica al volverla completamente digital ([Arias Giraldo, 2020](#)) (figura 4).



**Figura 4.** Etapa 3 de la digitalización

### **Pruebas de aceptación en fábrica (FAT) de subestaciones eléctricas digitales (SED)**

Estas pruebas son de vital importancia para la implementación de cualquier proyecto en el sector eléctrico ([Florián García y Bernal Gómez, 2018](#)), y con la llegada de las subestaciones eléctricas digitales no será la excepción. En esta sección se exponen algunas de las pruebas realizadas por algunas empresas a SED en laboratorios certificados, a partir de los lineamientos del estándar IEC 61850. Es importante reconocer que el ámbito de las pruebas en subestacio-

nes digitales es amplio y diverso, con una variedad de enfoques y métodos disponibles. Este artículo no pretende excluir otras pruebas relevantes, sino más bien resaltar las que mejor se alinean con los objetivos y alcances específicos de la investigación, como se observa en la figura 5.



Figura 5. Las FAT en subestaciones eléctricas digitales

## Pruebas de arquitectura de red

Dentro del estándar IEC 61850 se encuentran los lineamientos necesarios para comprobar que la arquitectura de red de las comunicaciones funcione correctamente (figura 5); aquí se deben efectuar distintas pruebas que garanticen el estado y condición de la red.

### *Evaluación del diseño de las arquitecturas para el bus de proceso y de estación*

Se evalúa el diseño de las redes de comunicaciones del *bus de proceso* y *bus de estación* con el objetivo de cumplir con los tiempos de respuesta y anchos de banda definidos en el estándar IEC61850, tanto entre equipos como entre niveles de control.

### *Evaluación del lenguaje de configuración de la subestación según IEC 61850-6(SCL)*

El estándar IEC 61850 permite representar cada elemento presente en el patio de la subestación como un nodo lógico, el cual se registra en un archivo SCL. Este archivo contiene toda la información relevante de la subestación. Se evalúan los archivos de definición de configuración SSD, ICD, IID, SCD, CID y SED para comprobar su integridad respecto a la IEC 61850-6 (Qian *et al.*, 2023).

### ***Evaluación del desempeño, y estabilidad en redes redundantes***

Durante esta prueba, se verifica la conformidad con los protocolos de redundancia de red establecidos por el estándar IEC 61850; así, se garantiza que la transmisión de paquetes de datos siempre llegue a su destino y que no se pierda información. El primero de estos protocolos es el Protocolo de Redundancia Paralela (PRP), el cual requiere que los IED dispongan de dos puertos de comunicación, conectados en una topología de anillo. El segundo protocolo, HSR, exige la presencia de dos redes de comunicación LAN, donde todos los IED que envían o reciben información están conectados a ambas. De esta manera, se establece un camino de respaldo que reduce el tiempo de recuperación de la red a cero.

### ***Pruebas de estrés en el bus de proceso y en el bus de estación***

Se carga la red con diferentes niveles de tráfico y se valida que la red tenga el ancho de banda requerido según los lineamientos de la IEC61850-90-4.

### ***Análisis de vulnerabilidades de la red (ciberseguridad)***

Se escanea la red buscando todos los puertos y servicios que se encuentren activos en cada uno de los equipos de red, en caso de contar con un servidor web para su configuración; así, se valida que este cuente con la seguridad mínima para evitar accesos o modificación de la configuración de forma indeseada.

### ***Pruebas de sincronización de tiempo***

Se valida que el dispositivo en prueba logre sincronizarse según el método implementado en la subestación.

### ***Pruebas por equipos y niveles***

Se debe tener en cuenta que los equipos cumplen un papel importante para el proceso de las pruebas, y aquí el estándar IEC 61850 expone los lineamientos adecuados dentro de la red de comunicaciones que aseguren correcto funcionamiento para la recepción y transmisión de datos. A continuación, se definen algunas de las pruebas realizadas a equipos en subestaciones digitales, como se observa en la figura 5.

### ***Pruebas de inyección***

Para el caso de las MU, se realiza una inyección secundaria para validar que los SV generados por estas reflejen de manera fiel la señal inyectada, tanto en fase como en amplitud (Balan *et al.*, 2018). Para el caso de relés de protección, inyecta SV o inyección secundaria para comprobar el correcto funcionamiento de las funciones de protección asociadas.

### ***Pruebas de integridad***

Consiste en aplicar inyecciones secundarias a las MU, que a su vez enviarán SV a los relés de protección, para validar la integridad del sistema, y para que la conversión analógica a digital de las señales sea precisa y libre de errores. De esta manera, la transmisión de datos a los sistemas de protección y control es confiable y sin pérdida de información. La salida de datos hacia los dispositivos de procesamiento y monitoreo debe ser coherente y conforme a los estándares establecidos.

### ***Pruebas de interoperabilidad***

Se valida la compatibilidad entre las configuraciones de diferentes fabricantes de IED. Las pruebas de interoperabilidad evalúan la capacidad de los IED para comunicarse, intercambiar datos, interpretar comandos y responder adecuadamente a eventos y condiciones del sistema ([Chen et al., 2012](#)).

### ***Prueba señales SCADA***

Los SAS suelen procesar cientos o miles de señales individuales. Estas deben adquirirse, procesarse y enviarse a varios destinos; por ejemplo, a un sistema SCADA. Durante el arranque de la subestación, así como después de la actualización del *firmware*, se deben probar todas estas señales ([Xi et al., 2016](#)).

### ***Prueba de la RTU/gateway y la configuración local de la HMI***

Las puertas de enlace locales, las RTU y las interfaces de usuario suelen comunicarse con casi todos los relés de protección del sistema, principalmente a través de informes, pero también con GOOSE. Normalmente, es necesario probar varios miles de señales por subestación. Durante la puesta en servicio, al menos las señales más críticas se prueban punto a punto, para estimular la señal en la subestación ([Xi et al., 2016](#)).

## **Resultados**

### **Requerimientos técnicos**

Los requerimientos técnicos para la implementación de subestaciones eléctricas digitales abarcan aspectos como la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes, la ciberseguridad para proteger la infraestructura contra amenazas cibernéticas, la monitorización y análisis de datos en tiempo real para optimizar la operación, la automatización y control avanzados para mejorar la eficiencia operativa, y la integración de dispositivos inteligentes como IED y sistemas de comunicación basados en *ethernet*, para garantizar una medición precisa

y una protección eficaz de la infraestructura eléctrica.

La tabla 1 detalla los requerimientos técnicos para la implementación de SED. Estos son fundamentales para garantizar su correcto funcionamiento y aprovechar al máximo los beneficios de la digitalización en el sector. Algunos de los aspectos clave incluidos en la tabla son la integración de IED, sistemas de comunicación basados en *ethernet*, la medición precisa y la protección eficaz de la infraestructura eléctrica.

**Tabla 1.** Requerimientos técnicos por etapas de una subestación eléctrica digital

<b>Nivel de proceso</b>	Elementos de patio convencionales. Transformadores de instrumentación no convencionales. Salidas binarias y análogas. Protocolo de comunicación SV.
<b>Bus de proceso</b>	Entradas binarias, análogas y salidas completamente digitales. Estándar IEC 61850-9-2 bus de proceso. Panel de agrupamiento digital con MU.
<b>Nivel de bahía</b>	IED de control y protección. Protocolo de comunicación GOOSE.
<b>Bus de estación</b>	Estándar IEC 61850-8-2 bus de estación.
<b>Nivel de estación</b>	Protocolos de comunicación MMS y GOOSE.
<b>SCADA</b>	HMI digital + Gateway. Gestión de datos en la nube.

A continuación, se describen los requerimientos necesarios para adelantar las FAT.

**Normatividad vigente**

El estándar IEC 61850 permite digitalizar la red de comunicaciones del sistema secundario de la subestación. En el estándar encontramos los protocolos de comunicación GOOSE, SV y MMS (Englert y Dawidczak, 2009) con los cuales se busca mejorar el envío y adquisición de los paquetes de datos que se transmiten por los buses de proceso y de estación, por medio de la fibra óptica. Sin embargo, el estándar IEC 61850 no contiene información acerca de la comunicación desde transformadores de instrumento. La norma NTC61869-9 establece los lineamientos para la comunicación entre los transformadores de instrumento y las MU (Stinskiy y De Oliveira, 2024). Es crucial considerar esta normativa, dado que los transformadores de corriente (TC) y de potencial (TP) marcan el inicio del sistema secundario de la subestación.

### Equipos y materiales

Es importante contar con el equipo adecuado al momento de realizar las pruebas. Vale la pena aclarar que este debe cumplir con las condiciones necearías mencionadas en la IEC 61850, con el objetivo de lograr el resultado esperado en cada prueba. Los materiales cumplen un papel crítico en la ejecución de las FAT, ya que facilitan la comunicación eficiente entre los diversos dispositivos electrónicos presentes en una SED. Su importancia radica en la capacidad para establecer y mantener conexiones precisas que garantizan el funcionamiento integrado y coordinado de los componentes del sistema. De igual manera, se necesitan elementos que posibiliten la visualización de las señales de voltaje y corriente que se registran en las pruebas. La tabla 2 presenta los equipos y materiales designados dentro de la investigación para cumplir con los requerimientos técnicos.

Tabla 2. Equipos y materiales

Equipos	Materiales
Merging Unit	Cables UTP
IED	Cables ethernet
Switch	Osciloscopio
Gateway	Multímetro
Maleta de inyección	
GPS de subestaciones	
Simulador en tiempo real	

### Herramientas de software

- *IED Scout*. Es una herramienta de gran beneficio para profesionales de automatización en protección y subestaciones que manejan dispositivos conforme a la norma IEC 61850. Facilita la interacción con los IED y ofrece funciones valiosas para su utilización. Este software emula todos los IED, lo que brinda a los usuarios evaluaciones exhaustivas de estos ([Hadbah et al., 2014](#)).
- *SV Scout*. Es una herramienta de medición y pruebas, dirigida a ingenieros especializados en protección y desarrolladores de IED, que trabajan con los valores muestreados según la norma IEC 61850 Sampled Values. SVScout se conecta a los flujos de valores muestreados de una o más unidades de fusión y grafica las corrientes y tensiones primarias ([Sumec, 2014](#)).
- *Station Guard*. Examina minuciosamente todas las comunicaciones para detectar posibles amenazas cibernéticas, actividades no autorizadas y errores ([Bajanek y Sumec, 2016](#)).

- *Station Scout*. Simplifica las pruebas de los sistemas de automatización de subestaciones (SAS) y reduce significativamente el esfuerzo para realizarlas. Este *software* fácil de usar ayuda a visualizar archivos SCL o rastrear señales en la subestación sin ningún esfuerzo de configuración (Xi *et al.*, 2016).

## Gemelos digitales

Los gemelos digitales se definen como un modelo, o representación virtual, diseñado con el fin de emular con exactitud un objeto físico, de estudiar o analizar su comportamiento y así crear escenarios hipotéticos que se puedan predecir (Gómez Luna *et al.*, 2019). La llegada de los gemelos digitales ha sido un gran avance en las tecnologías de sector eléctrico y aún más para la realización de pruebas en SED, ya que virtualizan la red eléctrica que se quiere probar, para así validar los resultados en la red eléctrica física (Qian *et al.*, 2023). La figura 6 presenta la arquitectura de red guía para la realización de las FAT. Se resaltan los equipos, materiales y *software* mencionados anteriormente.

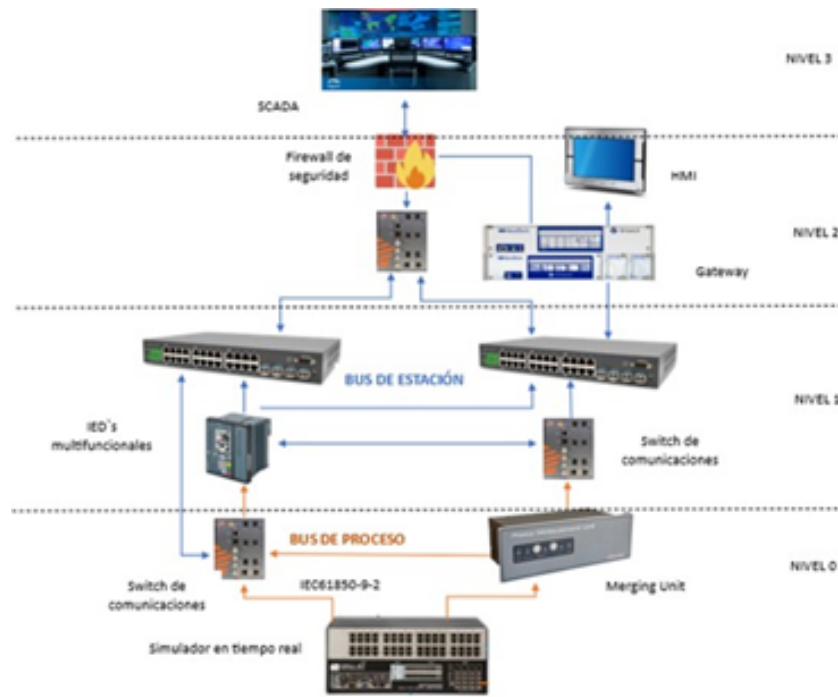


Figura 6. Arquitectura de red con el uso de gemelos digitales

En síntesis, la tabla 3 recopila las pruebas ya mencionadas, y detalla los requisitos específicos para su ejecución. Con esta organización se visualizan, clara y estructuradamente, los elementos esenciales que deben cumplirse en cada prueba.

**Tabla 3.** Requerimientos técnicos para llevar a cabo las FAT en una SED

<b>Prueba</b>	<b>Requerimientos técnicos generales o equipos</b>	<b>Software</b>
Evaluación del diseño de las arquitecturas para el bus de proceso y el bus de estación.	Se requiere estudiar las diferentes propuestas que empresas del sector eléctrico han evaluado para la arquitectura de red de una SED.	<i>StationScout</i>
Evaluación del desempeño, y estabilidad en redes redundantes (PRP/HSR).	Se requiere verificar los protocolos de redundancia HSR y PRP donde se utilizan IED junto con dos redes LAN (A y B), cumpliendo con los tiempos de conmutación según la IEC 61850-5.	<i>StationScout</i>
Pruebas de estrés en el bus de proceso y en el bus de estación.	Se requiere un ancho de banda según lo estipulado en la IEC 61850-90-4.	<i>StationScout</i>
Análisis de vulnerabilidades de la red.	Se requiere identificar ciberataques y posibles escenarios de amenaza.	<i>StationGuard</i>
Pruebas de sincronización de tiempo	Se requieren relojes GPS de subestaciones para la sincronización de cada uno de los elementos de la red.	<i>StationScout</i>
Pruebas de inyección y de integridad	Se requiere de una maleta de inyección secundaria que proporcione los valores de corriente y tensión específicos para la <i>merging unit</i> .	<i>SVScout</i>
Pruebas de interoperabilidad	Se requieren IED de diferentes fabricantes para estudiar la interacción entre estos, siguiendo los lineamientos de la IEC 61850-6.	<i>IEDScout</i>
Pruebas de inyección y de integridad	Se requiere de una maleta de inyección secundaria que proporcione los valores de corriente y tensión específicos para la <i>merging unit</i> .	<i>SVScout</i>
Pruebas de interoperabilidad	Se requieren IED de diferentes fabricantes para estudiar la interacción entre estos, siguiendo los lineamientos de la IEC 61850-6.	<i>IEDScout</i>
Prueba de la RTU/gateway y configuración local de la HMI	Se debe verificar que los <i>gateways</i> o RTU estén correctamente configurados, para ello debe garantizarse una comunicación adecuada entre estos equipos y los IED que se estén probando.	<i>StationScout</i>
Prueba señales SCADA	Se verifica que las señales que se transmiten desde el sistema SCADA al sistema HMI muestren las señales correctamente para garantizar su comunicación.	<i>StationScout</i>



## Conclusiones

La digitalización de subestaciones eléctricas ha demostrado mejoras significativas en la eficiencia, seguridad y calidad del servicio; por tanto, las subestaciones convencionales están llevando su proceso de digitalización por etapas, mediante la integración de tecnologías con señales binarias, hasta la implementación de sistemas avanzados de gestión de datos en tiempo real con señales completamente digitales. Esto supone una transición gradual hacia subestaciones completamente digitales, como se presentó en este estudio.

La transición a subestaciones eléctricas digitales proporciona beneficios para las empresas, los funcionarios y los operadores del sector. Al seguir un enfoque escalonado, se simplifica la transición hacia una infraestructura digital eficiente, segura y fiable, lo cual les permite a las empresas optimizar sus operaciones, mejorar la gestión de activos y reducir los costos operativos. Para los funcionarios y operadores, esta estrategia ofrece la adquisición gradual de nuevas habilidades y conocimientos en tecnologías avanzadas, lo cual redundará en una mejora sustancial en la calidad del servicio eléctrico y en la satisfacción de los clientes.

Esta investigación evidenció cómo el sector eléctrico ha venido usando el estándar IEC 61850 y la norma NTC 61869 para evaluar el desempeño y rendimiento de cada nivel de control de las subestaciones eléctricas; lo cual constituye una puerta de enlace para la transición exitosa hacia una infraestructura de subestación digital.

Tras el estudio acerca de las pruebas de aceptación en fábrica (*factory acceptance testing* [FAT]) en subestaciones digitales (SED), se analizaron en detalle los requerimientos para llevar a cabo estas las pruebas en cada uno de sus niveles; con esto se pretende que las empresas del sector eléctrico y la comunidad académica tengan, de primera mano, la descripción de cada requerimiento, con el fin de ahorrar costos, riesgos y tiempo en su implementación.

A lo largo del estudio, se evidencia la necesidad de una colaboración estrecha entre la Ingeniería Eléctrica, con las áreas de la electrónica y las telecomunicaciones, ya que así se alcanzará el objetivo de tener subestaciones completamente digitales, en cumplimiento de algunos de los apartados del Plan Energético Nacional (PEN) 2020-2050.

## Referencias

Aldana de León, F. A. (2007). *Sistemas ópticos digitales para medición de energía en alta tensión* [Trabajo de pregrado]. Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Altaher, A. (2021). The role of modern substation automation systems in smart grid evolution. *Bulletin IEEE Smart Grid*. <https://smartgrid.ieee.org/bulletins/august-2021/the-role-of-modern-substation-automation-systems-in-smart-grid-evolution>
- Arias Giraldo, T. (2020). *Evaluación, selección y análisis de arquitecturas de comunicación para subestaciones digitales y su aplicación en empresas del sector eléctrico* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/81381>
- Bajanek, T., y Sumec, S. (2016). Software tools for processing of sampled values transmitted via IEC 61850-9-2 protocol in LabView. En *2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)* (pp. 1-4). <https://doi.org/10.1109/EPE.2016.7521742>
- Balan, H., Laslo, H. D., y Varodi, T. (2018). Testing digital relays through secondary currents injection. En *2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)* (pp. 1-6). <https://ieeexplore.ieee.org/document/8551446>
- Barón Martínez, E. M., y Torres Ortega, J. M. (2017). *Ampliación del sistema SCADA para telecontrol de subestaciones eléctricas en una planta del sector industrial*. [Trabajo de especialización] Universidad Tecnológica de Bolívar. <https://repositorio.utb.edu.co/entities/publication/14fd10fa-7fc0-425b-b6b0-d4e4e1b77fa6>
- Chen, S.-J., Wang, Y.-H., Lin, C.-H., Zhan, T.-S., Chang, R.-F., y Chang, Y.-C. (2012). Using multi-vendor IEDs for IEC 61850 interoperability and HMI-SCADA applications. En *2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control* (pp. 745-748). <https://doi.org/10.1109/IS3C.2012.193>
- Claveria, J. J., y Kalam, A. (2020, November). Communication and Information Security Assessment of a Digital Substation. In *2020 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)* (pp. 1-7). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9344479/authors#authors>
- Comité Chileno del Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas (Cigre). (2020). *La inteligencia digital de las subestaciones Remehue y La Misión*. <https://www.cigre.cl/2020/09/03/la-inteligencia-digital-de-las-subestaciones-remehue-y-la-mision/>
- Crossley, P., Yang, L., Wen, A., Chatfield, R., Redfern, M., y Sun, X. (2011). Design and performance evaluation for a protection system utilising IEC 61850-9-2 process bus. En *2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection* (pp. 534-538). <https://doi.org/10.1109/APAP.2011.6180459>
- Englert, H. y Dawidczak, H. (2009). IEC 61850 Substation to control center communication – Status and practical experiences from projects. En *2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference* (pp. 1-6). <https://www.ewh.ieee.org/conf/powertech/2009/papers/367.pdf>

- Eslava, H., Rojas, L. A., y Pineda, D. (2015). An algorithm for optimal firewall placement in IEC61850 substations. *Journal of Power and Energy Engineering*, 3(4), 16-22. <https://doi.org/10.4236/jpee.2015.34003>
- Florián García, J. A., y Bernal Gómez, S. C. (2018). *Elaboración de procedimientos y protocolos para pruebas pre FAT y FAT de tableros de control, protección, medición y registro para la subestación Puerto Napo* [Trabajo de pregrado]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/8e2ec43e-2306-4c6f-8cad-96dd2d770274/content>
- García, E. (2022). ¿Qué es una merging unit? <https://es.scribd.com/document/623225318/Que-es-una-Merging-Unit-PAC-Academy>
- Gómez Luna, E., Zapata, C., y Fuertes Bravo, M. (2019). *Simulación en tiempo real como parte de la validación para la implementación de subestaciones digitales*. FISE-IEEE/CIGRE Conference, diciembre 4 al 6. Plaza Mayor Convenciones, Medellín (Colombia). <https://ieeexplore.ieee.org/document/8985001>
- Gutiérrez Salazar, L. A. (2020). *Caracterización de las subestaciones eléctricas de transmisión y distribución que hagan parte del SIN, del STR o del SDL dentro de la región central (Cundinamarca, Boyacá, Tolima, Meta y Bogotá D. C.), como parte del convenio marco de cooperación interinstitucional 064 de 2018* [Tesis de doctorado]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/items/efa89f9c-7df2-4ff6-88f7-5c4dbf46dbb6>
- Hadbah, A., Ustun, T. S., y Kalam, A. (2014). Using IEDScout software for managing multivendor IEC61850 IEDs in substation automation systems. En *2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)* (pp. 67-72). <https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2014.7007624>
- Huang, W. (2017). A practical guide of troubleshooting IEC 61850 GOOSE communication. En *2017 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)* (pp. 1-8). <https://doi.org/10.1109/CPRE.2017.8090009>
- IEEE Xplore. (2012). IEEE Standard for Electric Power Systems Communications-Distributed Network Protocol (DNP3). En *IEEE Std 1815-2012 (Revision of IEEE Std 1815-2010)* (pp. 1-821). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6327578>
- IEEE Xplore. (2017). IEEE recommended practice for implementing an IEC 61850-Based substation communications, protection, monitoring, and control system. En *IEEE Std 2030.100-2017* (pp. 1-67). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2017.7953513>

- Jaramillo Lozano, C. A. (2020). *Revisión crítica del uso de las técnicas de control distribuido aplicadas en la operación de redes eléctricas de distribución* [Tesis de pregrado]. Universidad del Valle. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/entities/publication/e1f881bc-5610-4fbc-b0fe-d65fd382df63>
- Ministerio de Minas y Energía. (2013). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas* (RETIE). <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/energia-electrica-2/reglamentos-tecnicos/reglamento-t%C3%A9cnico-de-instalaciones-el%C3%A9ctricas-retie/>
- Qian, P., Yu, M., Zhang, S., Jiang, S., Tang, J., y Dong, S. (2023). The application of digital twin technology in substation management. En *2023 International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications* (AEECA) (pp. 128-133). <https://doi.org/10.1109/AEECA59734.2023.00032>
- Radoglou-Grammatikis, P., Sarigiannidis, P., Giannoulakis, I., Kafetzakis, E., y Panaousis, E. (2019). Attacking IEC-60870-5-104 SCADA Systems. En *2019 IEEE World Congress on Services (SERVICES)* (pp. 41-46). <https://doi.org/10.1109/services.2019.00022>
- Raman, L., y Suresh, R. (2022). Nourshing legacy substation with digital substation. En *2022 22nd National Power Systems Conference (NPSC)* (pp. 402-406). <https://doi.org/10.1109/NPSC57038.2022.10068979>
- Rangelov, Y., Nikolaev, N., e Ivanova, M. (2016). The IEC 61850 standard – Communication networks and automation systems from an electrical engineering point of view. En *2016 19th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)* (pp. 1-4). <https://doi.org/10.1109/SIELA.2016.7543038>
- Schweitzer Engineering Laboratories. (s. f.). *Sistemas secundarios digitales*. <https://selinc.com/es/products/automation/power-system-automation/dss/>
- SRGwIN. (2021). *IEC 61850: explicado de manera fácil*. <https://www.sgrwin.com/es/iec-61850-explicado-de-manera-facil/.3>
- Stinskiy, A., y De Oliveira, E. (2024). Digital substation with process bus - A comparative review of IEC61850-9-2 and IEC 61869-9 standards. En *2024 77th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CFPR)* (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1109/CFPR61009.2024.10743036>
- Sumec, S. (2014). Software tool for verification of sampled values transmitted via IEC 61850-9-2 protocol. En *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)* (pp. 113-117). Brno-Bystrc, República Checa. <https://doi.org/10.1109/EPE.2014.6839413>

- Torres, R. J. D., y Venegas, A. (2001). *Mejoramiento del sistema de medida, control y protección para la subestación de potencia Salitre* [Tesis de pregrado]. Universidad de La Salle. <https://ciencia.lasalle.edu.co/items/7f29b41e-2750-4efa-a69f-69489840c318/full>
- Toscano Palacios, M. A. (2010). *Automatización de una subestación eléctrica utilizando el protocolo IEC 61850 y el IEC 61850 para el envío de datos* [Tesis de pregrado]. Universidad Ricardo Palma. <https://repositorio.urp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/82896a54-33fc-4f1f-b752-c6cb120a13e3/content>
- Xi, P., Yongchao, L., Zhiping, L., Feilai, P., y Long, L. (2016). Analyses and comparisons of SCL files in substation configurator. En *2016 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)* (pp. 297-300). <https://doi.org/10.1109/ICSAI.2016.7810971>



## Impacto ambiental de la minería artesanal de caliza en el departamento de La Guajira, Colombia

### Environmental impact of artisanal limestone mining in the department of La Guajira, Colombia

Michelle Cristine Velásquez Móvil<sup>1</sup>, Yazmín Adriana Mendoza Páez<sup>2</sup> y Danny Daniel López Juvinao<sup>3</sup>

Fecha de Recepción: 18 de Abril de 2024

Fecha de Aceptación: 29 de agosto de 2024

**Cómo citar:** Velásquez Móvil M.C., Mendoza Páez Y.A., y López Juvinao D.D. (2024). Impacto ambiental de la minería artesanal de caliza en el departamento de La Guajira, Colombia. *Tecnura*, 28(81), 106-122. <https://doi.org/10.14483/22487638.22077>

## Resumen

**Contexto:** el desarrollo de actividades productivas en torno a la roca caliza, en la mayoría de sus casos sin licencia ambiental, genera deterioro en los recursos naturales del departamento de La Guajira. Este tipo de acciones se vienen ejecutando desde hace más de tres décadas para el sustento económico de habitantes locales. El presente estudio evaluó los impactos ambientales generados por la minería artesanal de la roca caliza, específicamente en el área con alta presencia de este mineral: el municipio de Distracción.

**Metodología:** se implementa una matriz Leopold centrada en componentes escalares. Teniendo en cuenta la magnitud y el rango de importancia para determinar el nivel de impacto, se estudiaron 3 ASPI (factores bióticos, abióticos y antrópicos), su afectación por cada FARI y la incidencia en el territorio local.

**Resultados:** el análisis del impacto arrojó una magnitud escalar de -971 unidades de agregación, para un total de 56 impactos, de los cuales 8 son positivos, y 48, negativos, ubicados entre el rango 28 para categorización de impacto medio. Los factores con mayor amenaza en materia ambiental son el suelo y el aire. La actividad de aprovechamiento se desarrolla sin acciones de sostenibilidad.

**Conclusiones:** hay desarticulación de la minería de caliza e implementación de estrategias de manejo ambiental, las cuales agudizan la problemática ambiental territorial. Este tipo de estudios priorizan las necesidades ambientales de un departamento rico en recursos minero-industriales.

**Palabras clave:** caliza, impacto ambiental, matriz, nivel de impacto, rango de importancia.

<sup>1</sup>Ingeniera ambiental, Universidad de La Guajira, Riohacha (Colombia)<sup>ROR</sup>. Email: [mcvelasquez@uniguajira.edu.co](mailto:mcvelasquez@uniguajira.edu.co)

<sup>2</sup>Ingeniera ambiental, Universidad de La Guajira, Riohacha (Colombia)<sup>ROR</sup>. Email: [yadrianamendoza@uniguajira.edu.co](mailto:yadrianamendoza@uniguajira.edu.co)

<sup>3</sup>Ingeniero en minas. Doctor en Ciencias Gerenciales. Docente investigador, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Ipaitug, Universidad de La Guajira, Riohacha (Colombia)<sup>ROR</sup>. Email: [dlopezj@uniguajira.edu.co](mailto:dlopezj@uniguajira.edu.co)

## Abstract

**Context:** The development of productive activities around the limestone rock, in most cases without an environmental license, generates deterioration in the natural resources of the department of La Guajira. This type of action has been carried out for more than three decades for the economic support of the inhabitants. local. The present environmental study evaluated the impacts generated by artisanal mining of limestone rock, specifically in the area with a high presence of this mineral, which is the municipality of Distracción.

**Methodology:** A Leopold matrix centered on scalar components is implemented, mainly taking into account the magnitude and range of importance to determine the level of impact, 3 ASPI (biotic), (abiotic) and (anthropic) factors were studied, their impact on each FARI and the incidence in the local territory.

**Results:** The impact level obtained a scalar magnitude of -971 aggregation units, for a total of 56 impacts of which 8 are positive and 48 are negative; Located between range 28 for medium impact categorization, the factors with the greatest environmental threat are soil and air. The exploitation activity is carried out without the presence of sustainability actions.

**Conclusions:** There is a dismantling of limestone mining and the implementation of environmental management strategies. Which exacerbates the territorial environmental problem, the development of this type of studies is necessary because it prioritizes the environmental needs of a department rich in industrial mining type resources.

**Keywords:** Limestone, environmental impact, matrix, impact level, rank of importance.

---

## Introducción

En la actualidad, la contaminación ambiental es una problemática mundial y es uno de los retos que enfrenta la humanidad; debido a esto, múltiples países han centrado sus esfuerzos en generar conciencia sobre la protección de los recursos naturales y su uso de manera sostenible (Sánchez y Riosmena, 2021). Del mismo modo, en la región latinoamericana existen problemas ambientales de gran magnitud relacionados con el crecimiento demográfico, la extensión de áreas destinadas para procesos minero-industriales y la desarticulación a la normativa ambiental; lo que interfiere en el cumplimiento de las metas de sostenibilidad y trae impactos perjudiciales en la salud humana y el medio biofísico (Vives, 2022).

En cuanto a Colombia, la minería ha crecido de una manera considerable, tanto así que las exportaciones de materiales mineros representan el 25 % de las totales en el país (Agencia Nacional de Minería [ANM], 2021); dentro de la gama de minerales más representativos se encuentran los materiales para la construcción, el carbón, los minerales preciosos y, no menos importante, la roca caliza. Sin embargo, el panorama del sector abarca aspectos negativos, debido a la expansión de la minería ilegal, lo cual ocasiona transformación del paisaje, cambio de uso de suelos, desequilibrios en ecosistemas e impactos ambientales negativos. En este sentido, se denomina *impacto ambiental* a las modificaciones ocasionadas a los ecosistemas por proyectos, obras e, incluso, actividades de índole antropogénico, las cuales generan consecuencias que pueden variar desde positivo hasta irreversibles, dependiendo la magnitud y su incidencia en

el medio donde se ocasionen ([Atiwesh et al., 2021](#)).

Particularmente, las condiciones del territorio colombiano brindan la posibilidad de gozar de variabilidad fisiográfica; respecto a la caliza, su presencia resalta en la región Caribe y la cordillera Oriental. Se estima que el país cuenta con una producción de 15 millones de toneladas (Mton) anuales, y el mercado es liderado por organizaciones dedicadas a la comercialización de cemento y sus derivados ([ANM, 2015](#)).

Por su parte, la unión de la Sierra Nevada de Santa Marta y la serranía del Perijá hacen de La Guajira un departamento con yacimientos petrogenéticos de caliza influenciados por la litología y la mineralización ([Manco et al., 2019](#)). Según [Peralta et al. \(2022\)](#), en los municipios de Albania y Distracción existen afloraciones de calizas de buena calidad, intercaladas con sales aprovechadas en canteras con baja tecnificación, y destinadas a actividades de construcción y ornamentación.

Ahora, la susceptibilidad ambiental de las áreas destinadas para aprovechamiento de la caliza es notoria ([Hernández et al., 2014](#)), debido a que en las fases de producción se generan impactos significativos principalmente sobre los factores suelos y aire, lo que desglosa una problemática ([Franco, 2006](#)). Pese a que la explotación de la roca caliza se ha desarrollado hace más de 30 años dentro del territorio, existe un bajo índice de estudios relacionados con los impactos ambientales de esta actividad; no obstante, en torno a esta mineral existe un escenario promisorio y representativo, por encima de la media nacional. Lo más llamativo es que la presencia de esta roca sedimentaria está relacionada con formaciones de reservorios petroleros debido a su gran contenido de fósiles ([Pietro y Espinosa, 2011](#)).

En este sentido, los estudios de impacto ambiental se consideran una herramienta que brinda la posibilidad de estudiar alternativas e influir positivamente en el entorno; esto lo sustentan autores como [Méndez et al. \(2021\)](#); [Rabaia et al. \(2021\)](#) y [Habert et al. \(2020\)](#), quienes coinciden en que se pueden aprovechar los recursos naturales de manera equilibrada.

Por tanto, en este estudio se tiene como objetivo evaluar los impactos ambientales bióticos, abióticos y antrópicos, generados por el aprovechamiento de la roca caliza por medio de una matriz Leopold, la cual es aplicada en las empresas Cohornical y CalDistra, y en el área de Los Hornitos, ubicadas en el municipio de Distracción, La Guajira (Colombia) (figura 1), debido a que en esa zona existe la mayor influencia de yacimientos. [López Juvinao \(2010\)](#) estima que existen más de 3000 hectáreas donde este mineral se hace visible y llega a conformar una estructura gigante geológica a lo largo del cerro San Luis.



## Fuentes teóricas

### Servicios ambientales

Son todos aquellos beneficios que aportan los ecosistemas a los seres humanos para realizarse en todas sus facetas, y pueden ser recibidos en forma de bienes, servicios o valores. La preservación de los servicios ecosistémicos es una prioridad de la que depende la vida humana ([Organización de las Naciones Unidas \[ONU\], citada por Repsol, 2023](#)).

Para la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ([citada por Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, 2021](#)), los servicios ecosistémicos o ambientales son aquellos que la naturaleza o los procesos ecológicos proveen a los seres vivos y al planeta. Por tanto, son el motor del medioambiente. Son esenciales para la vida, por lo que la tierra, el agua, el aire, el clima y los recursos genéticos se deben utilizar de forma responsable para las presentes y futuras generaciones.

### Impacto ambiental

Las definiciones de impacto ambiental coinciden en la relación existente entre los efectos de una actividad humana sobre el medioambiente que supone una ruptura con el equilibrio ambiental; el MinAmbiente define impacto cualquier alteración en el medioambiente biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o de beneficio, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad ([Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible \[MinAmbiente\], 2021a](#)).

### Agotamientos de recursos

Es el efecto que surge del uso desmedido de los recursos no renovables; se debe a que estos se recuperan a una velocidad menor a la que son explotados, por lo que llegará un momento en el que estos se agoten por completo. En consecuencia, los ecosistemas son fragmentados y desestabilizados; las especies vegetales y animales corren riesgos de extinción, contaminación en ecosistemas terrestres y acuáticos, agotamiento de los recursos insustituibles y el impacto en el sistema capitalista y social ([Roperio Portillo, 2021](#)).

El agotamiento de los recursos naturales representa una de las mayores crisis ambientales. La sobreexplotación de recursos como el agua, los bosques, los minerales y combustibles fósiles está llevando a una degradación acelerada de los ecosistemas y a un desequilibrio en los ciclos naturales, afectando el medioambiente ([Mendoza \*et al.\*, 2024](#)).

## Buenas prácticas ambientales

Son acciones que logran ejecutar cambios importantes en cuanto a análisis ambientales y reducción de aquellos impactos que pueden ser perjudiciales, a través de una serie de medidas simples pero útiles que pueden adoptar con facilidad, ya sea en los espacios laborales, y que establecen cambios en los procesos y las actividades diarias, con lo cual se logra incrementar el compromiso y los resultados de mejora en el ambiente ([Centeno et al., 2021](#)):

son un conjunto de medidas que se deben aplicar en las actividades cotidianas con el propósito de eliminar o reducir los impactos negativos derivados de nuestras actividades. Se caracterizan por ser de fácil aplicación, de bajo costo y porque los resultados se obtienen en corto plazo. ([MinAmbiente, 2021b](#))

## Metodología

El tipo de estudio es no experimental, debido a que existe el análisis de la variable *impacto ambiental* sin manipulación de esta ([Blundell y Costa, 2000](#)) después de un análisis y observación detallado en campo; enriquecida con datos de documentos académicos y técnicos que brindan base de conocimiento al tema propuesto. Posteriormente, se implementa la matriz Leopold como herramienta clave de evaluación de impacto bajo los sistemas bióticos, abióticos y antrópicos ([Chunga y Chunga, 2022](#)).

## Características ambientales y áreas productivas seleccionadas

El corregimiento Los Hornitos, del municipio de Distracción, se encuentra a 193 m s. n. m. en las laderas del cerro San Luis, en el departamento de La Guajira (Colombia). Presenta una humedad relativa promedio anual de 72 %, con temperatura promedio de 28 °C con épocas templadas (junio y julio) y calurosas durante todo el año, precipitación media anual de 704,5 mm ([Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales \[Ideam\], 2024](#)).

En el sector del cerro San Luis se desarrollan actividades de extracción de material para construcción; esto se realiza en el arroyo El Chorro, donde también confluye el arroyo de San Luis; ambos ocupan entre 1000 y 2500 hectáreas ([Escuela Superior de Administración Pública \[ESAP\], 2017](#)). En la actualidad están siendo afectados por la deforestación y la adaptación para aprovechamiento antropogénico.

En cuanto a biodiversidad e importancia ambiental, el municipio de Distracción es una zona con más de 12 subcuencas, y es una franja rural con áreas estratégicas que cuentan con un valor hidrológico alto y áreas con alto potencial de atracción turística. Además, este municipio

forma parte de la Sierra Nevada de Santa Marta con una extensión de 8220 hectáreas ([Alcaldía Municipal de Distracción, 2012](#)). El valor estratégico del cerro San Luis radica en que está ubicado a 4,2 km de la Sierra Nevada de Santa Marta, con picos en forma de cono truncado, delimitado por lomas al oeste y cerros al noreste, como es el caso del Toco. Las particularidades de esta zona y la incidencia de los cauces hídricos ayudan a la formación de rocas sedimentarias, aunque los yacimientos de roca caliza se asocian a unidades cretácicas de la cuenca del río Ranchería ([López Juvinao, 2016](#)). Así, en el área de estudio confluyen especies típicas de estos ecosistemas en mención, las cuales son susceptibles al impacto generado por el sistema productivo de la roca caliza.

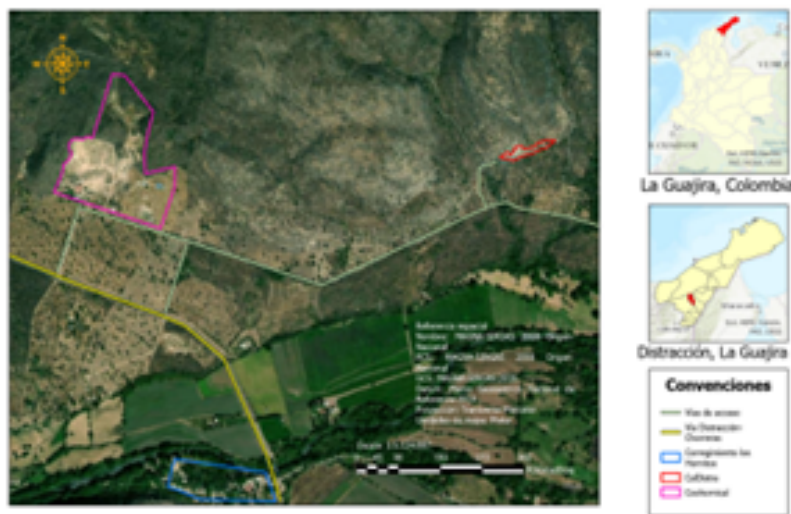


Figura 1. Localización del área de estudio

## Matriz Leopold

### *Criterios y atributos para valoración de impactos*

Para la evaluación ambiental, se tuvieron en cuenta las actividades laborales que se desarrollan como fases productivas de manera cíclica. En este sentido, se relacionaron los diversos factores ambientales y se estructuraron mediante el método cualitativo de la matriz Leopold, puesto que esta permite determinar impactos significativos y su valor de importancia en el medio ([Leopold et al., 1971](#)).

La incidencia de este tipo de matriz en las actividades de explotación minera está relacionada con estrategias de mejora en torno a los impactos categorizados como negativos. La información contemplada en la matriz Leopold fue estructurada con base en los criterios de evaluación que se detallan a continuación.

### *Magnitud*

Este atributo sirve para calificar la intensidad del cambio sufrido en el factor ambiental específico analizado, debido a cualquier actividad de carácter minero-industrial. En este caso se aplican los criterios propuestos por [Alex Enseña \(2021\)](#), donde se relacionan directamente la intensidad de la alteración de los factores con las fases productivas calificadas cualitativamente como “bajas”, y planteadas de manera escalar (tabla 1).

**Tabla 1.** Criterio escalar de magnitud

Magnitud			
Intensidad	Alteración	Calificación (-)	Calificación (+)
Baja	Baja	-1	1
Baja	Media	-2	2
Baja	Alta	-3	3
Media	Baja	-4	4
Media	Media	-5	5
Media	Alta	-6	6
Alta	Baja	-7	7
Alta	Media	-8	8
Alta	Alta	-9	9
Muy alta	Alta	-10	10

**Nota:** elaborada a partir de [Alex Enseña \(2021\)](#).

### *Rango de importancia*

La importancia de este atributo escalado reside en que cuenta con un marco de referencia para lograr una medición acertada; con su implementación se logran priorizar los resultados de impactos, su persistencia y extensión en el medio. Para este estudio se optó por los rangos de importancia planteados por [Viloria et al. \(2018\)](#), quienes asocian la valoración de impactos al área de influencia.

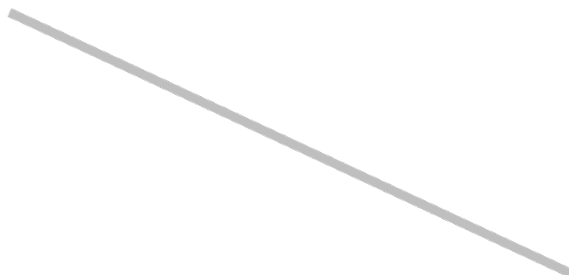
Según [Leopold et al. \(1971\)](#), la significancia ambiental que alcanza la matriz está ligada a la severidad de los impactos generados y a la medida gradual de estos; es decir, cuanto más afectado se vea un componente o factor, mayor será la incidencia y, por consiguiente, mayor será la problemática ambiental.

**Tabla 2.** Rango de importancia

Importancia		
Persistencia	Extensión	Calificación (+)
Fugaz	Puntual	1
Temporal	Puntual	2
Permanente	Puntual	3
Fugaz	Parcial	4
Temporal	Parcial	5
Permanente	Parcial	6
Fugaz	Extrema	7
Temporal	Extrema	8
Permanente	Extrema	9
Permanente	Total	10

**Nota:** elaborada a partir de [Viloria et al. \(2018\)](#).

Por otra parte, la magnitud e importancia se encuentran dentro de la matriz, cada celda (producto de la intersección de filas y columnas) se divide en diagonal, haciendo constar en la parte superior la magnitud del impacto (M) y en la parte inferior la persistencia o extensión de incidencia del impacto, como se muestra en la figura 2.



**Figura 2.** Celdas de magnitud e impacto para la matriz de Leopold

**Nota:** tomada de [Leopold et al. \(1971\)](#).

### *Nivel de impacto*

Según esta magnitud, un impacto ambiental se define como cualquier tipo de alteración en el entorno. Aunque comúnmente se asocia con efectos adversos, también pueden existir impactos positivos, ya sea de manera total o parcial. En la mayoría de los casos, los impactos son de

origen antrópico, derivados de proyectos o actividades humanas, y rara vez son causados por fenómenos naturales. Por tanto, el nivel de impacto se evalúa de manera escalar, incorporando actividades y atributos específicos (Arthuz y Pérez, 2019).

**Tabla 3.** Escala para determinar el nivel de impacto ambiental adaptada a matriz Leopold

Escala de impactos	
Impacto bajo	<20
Impacto medio	21-45
Impacto alto	46-70
Impacto crítico	>71

Así mismo, los impactos son categorizados y evaluados según las modificaciones generadas al medio. Para este estudio se aplicó la evaluación de nivel de impacto según lo propuesto por (Dellavedova, 2011), quien utiliza los siguientes criterios:

- *Impacto bajo*: se tienen en cuenta todas aquellas modificaciones que resultan ser de afectación mínima en un factor ambiental específico del ecosistema.
- *Impacto medio*: entran en esta categoría las modificaciones consideradas medias en algunos factores ambientales.
- *Impacto alto*: para entrar en esta categoría deben existir múltiples alteraciones en los factores ambientales con algunos deterioros específicos.
- *Impacto crítico*: se considera la categoría más peligrosa, pues en esta se generan alteraciones severas e incluso de tipo irreversibles en el ambiente; se ocasiona destrucción total del factor ambiental.

Vale la pena resaltar que, para determinar el valor total del impacto de una actividad específica, en este caso la minería de caliza, se logra promediando el número de impactos tantos positivos como negativos y, posteriormente, se hace una división que incluye el número de ejes principales definidos para la matriz; aquí sería el eje principal positivo y el eje principal negativo, es decir 2. Entonces, la ecuación se establece de la siguiente manera (García *et al.*, 2018):

$$\text{Valor de escala de impactos} = \frac{\text{número de impactos positivos} + \text{número de impactos negativos}}{2}$$

Finalmente, con la aplicación de un método sencillo usado por Lago Pérez (1997), el cual tiene en cuenta los valores que se encuentran en las casillas de comprobación que son parte de la matriz, estos se calculan a través de las sumatorias de los impactos determinados en las casillas de agregación de impactos tanto en la fila como en la columna, y si sus valores coinciden, se puede definir que la evaluación fue realizada de forma correcta.

## Resultados

En este aparato se presentan los resultados del estudio realizado, a través de revisiones bibliográficas, visitas de campos y aplicación de una matriz como herramienta central. Se representan los impactos ambientales actuales resultados de una actividad evolutiva y constante en Distracción, La Guajira. Estudios como el de [López Juvinao \(2010\)](#) coinciden en que el aprovechamiento de la caliza se da de manera artesanal, pero a una escala significativa debido a que se procesan hasta 45 toneladas diarias de caliza destinadas a producción de materiales de construcción y sus derivados.

En la actualidad, el territorio colombiano presenta un debate en la aplicación de los términos *desarrollo sustentable* o *desarrollo sostenible*; por tanto, es indispensable identificar los impactos ambientales de la caliza como una perspectiva que ayude a solucionar problemas ecológicos de la región. Según [Cajamarca et al. \(2024\)](#) la perdurabilidad de los recursos a lo largo del tiempo es lo que hace a una actividad minera sustentable; pese a la variabilidad y presencia de más de 3057 hectáreas de caliza, no existe una producción asociada a la sostenibilidad. [Salomón y Graham \(2003\)](#) consideran que la minería de caliza debe estar siempre en constante estudio, debido a que con esto se logra aportar al conocimiento de un elemento tan usado como la roca caliza. Por tanto, se formuló una matriz bajo los criterios de autores como Luna ([mencionado en Alex Enseña, 2021](#)); [Viloria et al. \(2018\)](#); [Dellavedova \(2011\)](#), y [Leopold et al. \(1971\)](#), la cual se detalla en la Figura 3 (Matriz).

Se identificaron cuatro actuaciones susceptibles de producir impacto (ASPI). [Cotes et al. \(2018\)](#) aplicaron este término para hacer referencia a las operaciones o procedimientos productivos que de manera progresiva tienden a producir cambios en el medio. Entre los identificados están extracción, trituración, calcinación e hidratación, los cuales concuerdan con esta investigación y se evidencia que suelen ser comunes en la extracción de minerales como yeso y arcilla, y también se asocian a la minería de caliza. Por otra parte, existen tres factores ambientales receptores de impactos (FARI), que fueron los sistemas abiótico, biótico y antrópico ([Al-Nasrawi et al., 2020](#)) (tabla 4).

Tabla 4. Categorización del impacto

Número	Impactos totales	46	Escala de impactos	
	Impacto positivo	8	Impacto bajo	<20
	Impacto negativo	48	Impacto medio	21-45
Promedio	Impacto	28	Impacto alto	46-70
21-45			Impacto crítico	>71

Matriz de impacto ambiental de la minería artesanal de caliza en el departamento de La Guajira, Colombia										
Factores Ambientales			Actividades	Extracción	Trituración	Calcinación	Hidratación	Positivos	Negativos	Agregación de impacto
Indicadores Abióticos	Agua	Cambios de uso	-2 2	-1 1	-2 2	-10 9	0	4	-99	
		Calidad del agua superficial	-8 2	-1 4		-8 3	0	3	-44	
	Suelo	Calidad del suelo	-10 10	-2 1	-5 4	-2 2	0	4	-126	
		Degradación de capa orgánica	-9 8		-4 3	-3 3	0	3	-93	
		Vertederos de residuos peligrosos	-10 6	-3 2	-6 6	-4 3	0	4	-114	
		Propiedades edáficas	-8 5		-3 2	-3 1	0	3	-49	
	Atmósfera	Calidad del aire	-7 3	-5 3	-9 8	-1 1	0	4	-109	
		Ruido	-4 1	-4 2			0	2	-12	
		Temperatura		-2	-8 5		0	2	-40	
Indicadores Bióticos	Flora	-7 6	-2 4	-8 6	-3 2	0	4	-104		
	Fauna	Deforestación	-9 5		-9 7		0	2	-108	
		Habitats			-6 6	-3 4	0	2	-48	
		Aumentamiento	-3 2	-2 1	-6 4		0	3	-32	
Factores antrópicos	Humano	-7 6	-2 1	-8 7	-1 1	0	4	-101		
	Socio-ambiental	Empleo	8 4	8 4	6 2	5 2	4	0	86	
		Paisaje natural y armonía visual	-8 6	-1 2	-6 4	-2 1	0	4	-76	
		Desarrollo local	7 6	5 4	4 3	8 3	4	0	98	
AFECTACIONES POSITIVAS			2	2	2	2	COMPROBACIÓN			
AFECTACIONES NEGATIVAS			13	11	13	11	-971			
AGREGACIÓN DEL IMPACTO			-426	2	-417	-130	-971			

Figura 3. Matriz de impacto ambientales bajo el método Leopold

Como resultado, se determinó que las actividades de aprovechamiento minero generan un impacto ambiental de -971 unidades de agregación, lo que supone un rango de afectación considerable para el entorno. El nivel de impacto evaluado según la escala está en el rango de 21-45, lo cual lo califica como impacto medio, teniendo 8 impactos positivos y 48 negativos, según lo expuesto por [García et al. \(2018\)](#), para un total de 56 impactos.

En cuanto a la afectación por ASPI, la extracción es una de las fases que ocasiona mayores afectaciones, con un total de -426 unidades de agregación. [Cotes et al. \(2018\)](#) también concuerdan en que el factor suelo es receptor de impactos severos, con cambios de propiedades edáficas, degradación de capa orgánica y, además, es fuente receptora de residuos sólidos. Por



otra parte, -417 es el valor obtenido para la calcinación, cifra considerable debido a que los hornos artesanales tienen una capacidad de 4 toneladas; cada uno de ellos es alimentado por 4 burros de leñas obtenidas de la misma área de aprovechamiento.

Se pudo observar que existe deforestación debido a que no existe un área destinada a la siembra de árboles leñosos para dicha actividad ([Pardo y Salazar, 2013](#)). Las temperaturas alcanzadas en la calcinación están alrededor de 800 °C, cuando la roca caliza pierde dióxido de carbono y produce óxido de calcio; además, se registran altas emisiones de dióxido de carbono y contaminantes atmosféricos.

Entre los impactos positivos se encuentra la generación de empleo, lo que se considera positivo con un promedio aritmético de 86, ya que esta actividad es una fuente de alta importancia económica para los pobladores quienes son la mano de obra ([López Juvinao, 2021](#)). Los resultados muestran 98 unidades agregación para el desarrollo regional, vistas desde un factor económico; sin embargo, es evidente la necesidad de implementar acciones ambientales que articulen la actividad a fases sostenibles, ya que se utiliza material rudimentario y no se contemplan medidas de manejo ([Soto Cabrera et al., 2020](#)).

Por su parte, el proceso de hidratación obtuvo -130 unidades. El agua utilizada para esta actividad es comprada en carrotanques, y se requiere un total de 120 galones para cada unidad productiva con frecuencia de dos días. Las aguas residuales de esta actividad no son tratadas lo que es una problemática ya que las escorrentías llegan a fuentes hídricas cercanas alterando sus características físicas ([Cotes et al., 2018](#)), a esto se le suma los aportes de sedimentación generados por escombros y materiales considerados estériles, al igual que en el estudio de [Mendoza et al. \(2021\)](#).

Del mismo modo, la trituración, pese a ser la fase con menos puntuación –con un total de 2 agregaciones–, también afecta al medio, debido a que para este se utiliza una tolva de molino primario que genera vibraciones y ruido ambiental, lo cual influye en la armonía de manera temporal en el área, ocasiona ayuntamiento de fauna y reverberación en la flora. El hollín resultante de esta actividad puede alojarse con facilidad en el sistema respiratorio y causar afecciones en la salud humana ([Ramírez Ruiz et al., 2021](#)).

Sin embargo, existe algo más llamativo: la desarticulación ambiental a las normativas pertinentes. Pese a que actualmente las minas operan como proyecto social, la Corporación Autónoma Regional ha impuesto medidas preventivas de suspensión de actividades e investigación administrativa sancionatoria ambiental y otras disposiciones. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible sustenta que todo aquel proyecto para su formalización minera debe

adelantar trámites de elaboración del estudio de impacto ambiental temporal anualmente. Hoy, las empresas dedicadas a esta actividad adelantan estudios de impacto ambiental, para poder conseguir la licencia ambiental (MinAmbiente, 2021a).

## Conclusiones

Los resultados revelaron que existe poca articulación de las fases productivas con acciones de sostenibilidad. Pese a que esta actividad económica se lleva a cabo desde hace más de trescientos años con alta incidencia económica, en el área se sigue desarrollando bajo aprendizajes culturales, razón por la cual es pertinente la implementación de estrategias de manejo ambiental.

Además, en esta industria del departamento guajiro se ejecutan diversas actividades que desarrollan la gestión humana, desde las cuales se implementan criterios que propenden a la protección sistema natural. Por ello, para el trabajo de extracción de caliza se utilizan alternativas conjuntas como maquinaria pesada y manual, que se alternan para garantizar un trabajo más rápido, debido a la carencia de sistemas tecnificados y el uso de modelos convencionales; muestra esto es la falta de avances en materia de tecnificación.

También, los esfuerzos deben centrarse en minimizar los impactos para el factor suelo y aire, ya que son los mayormente afectados. Este proceso deberá efectuarse de la mano de las entidades ambientales, ya que facilitaría la puesta en marcha. No obstante, se pueden identificar acciones de bajo presupuesto en materia de gestión, como es el caso de la reforestación con plantas autóctonas, para así cimentar la cultura ambiental dentro de las organizaciones. Desarrollar este tipo de estudios ayuda a identificar las necesidades territoriales en torno a las actividades de significancia en un departamento con tantas riquezas ecosistémicas como el de La Guajira.

## Financiamiento

El presente estudio fue financiado y avalado por la Universidad de La Guajira, sede Riohacha.

## Referencias

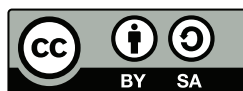
Agencia Nacional de Minería (ANM). (2015). *Bitácora de la infraestructura caliza*. <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/calizas.pdf>

- Agencia Nacional de Minería (ANM). (2021). *Colombia tiene un potencial de exportación ilimitado hacia los mercados internacionales*. <https://www.anm.gov.co/colombia-tiene-un-potencial-de-exportacion-ilimitado-hacia-los-mercados-internacionales>
- Alcaldía Municipal de Distracción. (2012). *Plan municipal para la gestión del riesgo de desastres*. [http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28337/PMGRD-DistraccionGuajira\\_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28337/PMGRD-DistraccionGuajira_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Alex Enseña. (4 de marzo de 2021). *Matriz de Leopold* [Archivo de video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=4SbW6G9XjhM&t=14s&ab\\_channel=AlexEnse%C3%B1a](https://www.youtube.com/watch?v=4SbW6G9XjhM&t=14s&ab_channel=AlexEnse%C3%B1a)
- Al-Nasrawi, F. A., Kareem, S. L., y Saleh, L. A. (2020). Using the Leopold matrix procedure to assess the environmental impact of pollution from drinking water projects in Karbala city, Iraq. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 671(1), 012078.
- Arthuz-López, L., y Pérez-Mora, W. (2019). Alternativas de bajo impacto ambiental para el reciclaje del poliestireno expandido a nivel mundial. *Informador Técnico*, 83(2), 209-219. <https://doi.org/10.23850/22565035.1638>
- Atiweh, G., Mikhael, A., Parrish, C., Banoub, J., y Le, T. (2021). Environmental impact of bioplastic use: a review. *Heliyon*, 7(9), e07918. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07918>
- Blundell, R., y Costa Dias, M. (2000). Evaluation methods for non-experimental data. *Fiscal Studies*, 21(4), 427-468. <https://doi.org/10.1111/j.1475-5890.2000.tb00031.x>
- Cajamarca, E., Alvarado, G., y Vázquez, J. (2024). La asociatividad en el reciclaje como estrategia de desarrollo sostenible. *Estudios de la Gestión: Revista Internacional de Administración*, (15), 149-172. <https://doi.org/10.32719/25506641.2024.15.7>
- Centeno Guerrón. M. L, y Ramírez Ortiz, C. M. (2021). *Educación ambiental e implementación de buenas prácticas ambientales y de consumo sostenible en la universidad Israel* [Tesis de pregrado]. Repositorio Digital Universidad Tecnológica de Israel. <http://repositorio.uisrael.edu.ec/handle/47000/2779>
- Chunga Quispe, A. K., y Chunga Quispe, J. J. (2022). *Revisión sistemática de estudios de evaluación del impacto ambiental que utilizan la matriz Leopoldo y Conesa como herramientas* [Tesis de pregrado]. Universidad Cesar Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/22380>
- Cotes, D., Correa, H., Ricardo, J., Soto, E., y Torres, D. (2018). Plan de manejo ambiental de la mina Hornical en el municipio de Distracción, La Guajira. *Revista Agunkuyâa*, 8(1), 60-73. <https://doi.org/10.33132/27114260.1230>

- Dellavedova, M. (2011). *Guía metodológica para la elaboración de una evaluación de impacto ambiental*. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de la Plata. <https://www.lwestudioambiental.com.ar/wp-content/uploads/2018/08/Ficha-17-GUIA-METODOLOGICA-PARA-LA-ELABORACION-DE-UNA-EIA.pdf>
- Escuela Superior de Administración Pública (ESAP). (2017). *Esquema de Ordenamiento Territorial*. <https://repositoriocrdim.esap.edu.co/handle/20.500.14471/22011>
- Franco, G. (2006). Gestión de recursos minerales: valoración económica de los depósitos de calizas de Colombia. *Gestión y Ambiente*, 9(2), 91-101. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/52074>
- García, M., Velásquez, S., Chiw, V., y Landeros, B. (2018). Elaboración de una matriz de impacto ambiental en la Fundidora Especializada del Nazas S.A. de C.V. *Revista Aristas: Investigación Básica y Aplicada*, 6(n.º esp. 12), 218-222.
- Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., y Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(11), 559-573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- Hernández-Jatib, N., Ulloa-Carcasés, M., Almaguer-Carmenate, Y., y Ferrer, Y. R. (2014). Evaluación ambiental asociada a la explotación del yacimiento de materiales de construcción La Inagua, Guantánamo, Cuba. *Luna Azul*, (38), 146-158.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2024). *Informe técnico diario*. Boletín 18. <https://acortar.link/hF2Ecy>
- Lago Pérez, L. (1997). *Metodología general para la evaluación de impacto ambiental de proyectos*. Empresa de ingeniería y proyectos del níquel. Cuba, 30-50. <http://www.monografias.com/trabajos14/elimpacto-ambiental/elimpacto-ambiental.shtml#glo>
- Leopold, L. B., Clarke, F. E., Hanshaw, B., y Balsley, J. (1971). *A procedure for evaluating environmental impact*. Circular 645. US Department of the Interior.
- López Juvinao, D. (2016). *Mucho más que carbón. El escenario minero de La Guajira*. (1.ª ed.). Grupo de Investigación contacto con la comunidad. <https://es.slideshare.net/elturcolopez/libro-sobre-mineria-en-la-guajira>
- López Juvinao, D. D. (2010). *Mucho más que carbón. El escenario minero de La Guajira*. 1st ed. Riohacha, La Guajira, Colombia.

- López Mamani, E. G. (2021). *Impacto ambiental por la matriz Leopold y la matriz Conesa en la cantera Querulpa para un plan de contingencia, Arequipa 2021* [Tesis de pregrado]. Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/71807>
- Manco Jaraba, D. C., Ariño Díaz, K. R., y Rojas Martínez, E. E. (2019). Prospección y caracterización del yacimiento de cobre, en la vereda Los Cueros, Villanueva, departamento de La Guajira-Colombia. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, 27(2), 288-294. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000200288>
- Méndez Cadena, M. E., Fascinetti Bárcena, G., Ocampo Fletes, I., y López Sánchez, H. (2021). Saberes y acciones de jóvenes del medio rural frente a problemas ambientales. *Tecnura*, 25(68), 125-139. <https://doi.org/10.14483/22487638.15775>
- Mendoza Zapata, L. A., Pacheco Bustos, C. A., y Certain Abraham, W. D. (2021). Evaluación de impactos ambientales asociados a la eventual recuperación ambiental de canteras con residuos inertes de construcción y demolición en Barranquilla y su área metropolitana. *Ingeniería y Desarrollo*, 39(2), 275-295. <https://doi.org/10.14482/inde.39.2.628>
- Mendoza, J., Buitrago, D., Navas, W., y Suriaga, M. (15 de diciembre de 2024). El agotamiento de los recursos naturales y su efecto en el medio ambiente. *MQ-RInvestigar: Revista Multidisciplinaria Arbitrada de Investigación Científica*, 8(4), 1611-1626. <https://www.investigarmqr.com/ojs/index.php/mqr/article/view/1874#:~:text=Resumen,la%20vida%20en%20nuestro%20planeta>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente). (2021a). *Listado de impactos ambientales específicos, 2021*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/04/Listado-de-Impactos-Ambientales-Especificos-2021-V.4.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente). (21 de junio de 2021b). *Guía de buenas prácticas ambientales*. [https://sigestion.minambiente.gov.co/files/mod\\_documentos/documentos/G-E-SIG-04/versiones/Guia%20de%20buenas%20practicass%20ambientales.pdf](https://sigestion.minambiente.gov.co/files/mod_documentos/documentos/G-E-SIG-04/versiones/Guia%20de%20buenas%20practicass%20ambientales.pdf)
- Pardo Celis, K., y Salazar Martínez, E. M. (2013). *Minería, medio ambiente y paisaje cultural cafetero en el municipio de Quinchía, Risaralda: un reto hacia la sustentabilidad* [Tesis de pregrado]. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Peralta, L. C. L., Jaraba, D. C. M., Bolaño, F. E. C., Martínez, E. E. R., y Suárez, J. A. M. (2022). Análisis geoquímico de las calizas de la Cantera Centro Minero Cohornical, municipio de Distracción-La Guajira (Colombia): aporte en la determinación de su uso como material industrial. *Prospectiva*, 20(1). <http://ojs.uac.edu.co/index.php/prospectiva/article/view/2716/2489>

- Pietro Rincón, G., y Espinosa González, Á. (eds.). (2011). *Manual de geoquímica. Muestreo de ultrabaja densidad y de baja, media y alta densidad*. Servicio Geológico Colombiano. <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/view/78/74/560>
- Ropero Portillo, S. (24 de mayo de 2021). Agotamiento de los recursos naturales: causas y consecuencias. *EcologíaVerde*. <https://www.ecologiaverde.com/agotamiento-de-los-recursos-naturales-causas-y-consecuencias-3396.html>
- Rabaia, M. K. H., Abdelkareem, M. A., Sayed, E. T., Elsaid, K., Chae, K. J., Wilberforce, T., y Olabi, A. G. (2021). Environmental impacts of solar energy systems: a review. *Science of The Total Environment*, 754, 141989.
- Ramírez Ruíz, J., Reyes Velasco, L., Sánchez Cruz, G., Castillo Real, L. M., y Bernardino-Hernández, H. U. (2020). La elaboración de tostadas por mujeres de la costa de Oaxaca: el sustento económico que pone en riesgo su salud. *Estudios Sociales: Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 30(56). <https://dx.doi.org/10.24836/es.v30i56.974>
- Repsol. (19 de septiembre de 2023). *El regalo de la naturaleza*. <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/servicios-ecosistemas/index.cshml>
- Salomón, L. A. A., y Graham, L. E. (2003). Estudio de las propiedades de la roca caliza de Yucatán. *Ingeniería*, 7(1), 27-36. [www.redalyc.org/articulo.oa?id=46770103](http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46770103)
- Sánchez, M. y Riosmena, F. (2021). Cambio climático global, ecología política y migración. *Revista de Estudios Sociales*, (76), 2-6. <https://doi.org/10.7440/res76.2021.01>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México. (11 de marzo de 2021). *Servicios ambientales o ecosistémicos, esenciales para la vida*. <https://goo.su/Kv5k6>
- Soto Cabrera, A. I., Panimboza Ojeda, A. P., Ilibay Granda, C. G., Valverde Lara, C. R., y Diéguez Santana, K. (2020). Impacto ambiental de la operación del Centro de Faenamiento de la ciudad de Puyo, Pastaza, Ecuador. *Prospectiva*, 18(1), 60-68. <https://doi.org/10.15665/rp.v18i1.2101>
- Viloria Villegas, M. I., Cadavid, L., y Awad, G. (2018). Metodología para evaluación de impacto ambiental de proyectos de infraestructura en Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 28(2), 121-156. <https://doi.org/10.18359/rcin.2941>
- Vives, A. (2022). *Social and environmental responsibility in small and medium enterprises in Latin America*. Inter-American Development Bank.



## Diseño y calibración de un dispositivo de bajo costo para la medición del flujo de savia en especies forestales

### Design and calibration of a low-cost device for measuring sap flow in forest species

Ana Milena López-Aguirre <sup>1</sup> y Alonso Barrios-Trilleras <sup>2</sup>

Fecha de Recepción: 25 de mayo de 2024

Fecha de Aceptación: 1 de agosto de 2024

**Cómo citar:** López Aguirre, A. M., y Barrios Trilleras, A. (2024). Diseño y calibración de un dispositivo de bajo costo para la medición del flujo de savia en especies forestales. *Tecnura*, 28(81), 123-146. <https://doi.org/10.14483/22487638.22220>

## Resumen

**Objetivo:** El estudio tiene como objetivo diseñar y calibrar un dispositivo de bajo costo para monitorear el flujo de savia en especies leñosas, utilizando el método de la razón de calor como equivalente de la transpiración.

**Métodología:** El dispositivo consta de un sensor y un sistema de control y adquisición de datos programado con *Arduino IDE*. La capacidad de detectar variaciones mínimas de temperatura, y el consumo energético fueron evaluados. La calibración del dispositivo incluyó la comparación y evaluación de la velocidad del flujo de savia ( $F_d$ ) estimada frente a la obtenida mediante un lisímetro de pesaje en plantas de *Gmelina arborea* en invernadero. Adicionalmente, una evaluación en condiciones de campo comparó las tasas de transpiración obtenidas con el dispositivo en un árbol de *Gmelina arborea* con la evapotranspiración potencial ( $ET_0$ ).

**Resultados:** El dispositivo demostró una alta efectividad, ya que permitió la medición de variaciones de temperatura de hasta 0,004 °C, con un bajo consumo energético promedio de 6,84 mAh. Los datos de  $F_d$  obtenidos por el dispositivo mostraron una relación lineal significativa con los valores de  $F_d$  medidos con el lisímetro, con un  $R^2 = 0,791$ . Una prueba  $t$  indicó que no hubo diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre la  $F_d$  medida por ambos métodos. Además, se observó una fuerte congruencia entre las mediciones de transpiración obtenidas con el dispositivo y la  $ET_0$ , lo cual señala la confiabilidad del dispositivo.

**Conclusiones:** El dispositivo desarrollado demostró un comportamiento estable y adecuado. Pudo detectar con precisión las variaciones de temperatura asociadas al flujo de savia en árboles de *Gmelina arborea*. También, generó información crucial para comprender los requerimientos hídricos de especies leñosas, lo que puede orientar decisiones de manejo forestal y silvicultura, especialmente en el contexto del cambio climático.

**Palabras clave:** *Gmelina arborea*, transpiración, método de la razón de calor.

<sup>1</sup>Magíster en Recursos Forestales, candidata a doctora en Planificación y Manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas. Profesora asociada, Departamento de Ciencias Forestales, Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima.  Email: [amlopeza@ut.edu.co](mailto:amlopeza@ut.edu.co)

<sup>2</sup>Doctor en Ciencias Forestales. Profesor asociado, Departamento de Ciencias Forestales, Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima.  Email: [abarriost@ut.edu.co](mailto:abarriost@ut.edu.co)



## Abstract

**Objective:** The study aims to design and calibrate a low-cost device to monitor sap flow in woody species, using the heat ratio method as a proxy of transpiration.

**Methodology:** The device consists of a sensor and a data acquisition and control system programmed with Arduino IDE. The ability to detect minimal temperature variations and energy consumption were evaluated. Device calibration included comparing and evaluating the estimated sap flow rate ( $F_d$ ) against that obtained using a weighing lysimeter on *Gmelina arborea* plants in a greenhouse. Additionally, a field evaluation compared the transpiration rates obtained with the device on a *Gmelina arborea* tree with potential evapotranspiration ( $ET_0$ ).

**Results:** The device demonstrated high effectiveness, allowing the measurement of temperature variations down to 0.004 °C, with a low average energy consumption of 6.84 mAh. The  $F_d$  data obtained by the device showed a significant linear relationship with the  $F_d$  values measured by the lysimeter, with an  $R^2 = 0,791$ . A  $t$ -test indicated no significant differences ( $p > 0,05$ ) between the  $F_d$  measured by both methods. Additionally, a strong congruence was observed between the transpiration measurements obtained with the device and  $ET_0$ , demonstrating the reliability of the device.

**Conclusions:** The developed device demonstrated stable and adequate performance. It was able to accurately detect temperature variations associated with sap flow in *Gmelina arborea* trees. The device can generate crucial information to understand the water requirements of species, which can guide forest management and silviculture decisions, especially in the context of climate change.

**Keywords:** *Gmelina arborea*, transpiration, heat ratio method.

---

## Introducción

La cuantificación del agua utilizada por los bosques es fundamental para comprender su papel en el balance hídrico y en el funcionamiento de los ecosistemas. En particular, esto adquiere una relevancia crítica en ecosistemas forestales secos, donde el agua es un recurso limitado, y en sistemas de producción forestal que dependen de su manejo eficiente (Bhattacharya, 2019; Medrano *et al.*, 2007; Suárez *et al.*, 2021). Conocer los requerimientos hídricos de los bosques es esencial no solo para evaluar su capacidad de resiliencia frente a eventos climáticos extremos, como sequías prolongadas, sino también para prever cómo podrían responder a los cambios climáticos proyectados (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014). Además, esta información es clave para desarrollar estrategias de manejo y adaptación que aseguren la sostenibilidad de los bosques y los servicios ecosistémicos que proveen, como la regulación del ciclo del agua y la mitigación del cambio climático (Hakamada *et al.*, 2020).

El agua utilizada por un árbol generalmente se determina mediante la cuantificación del agua transpirada por las hojas. La medición de la transpiración puede efectuarse a diferentes escalas, donde la medición a nivel de hoja es el método más fácil, por tanto, el más utilizado en investigación, principalmente en viveros o invernaderos. Sin embargo, este método, que requiere equipos especializados y costosos para la medición del flujo de gases, tiene la dificultad



de escalar los valores obtenidos al nivel de toda la planta o rodal o cuenca hidrográfica (Cárdenas *et al.*, 2019; Miner *et al.*, 2017).

Métodos más robustos para la estimación de la transpiración a nivel de planta incluyen lisímetros que pueden usarse en macetas o árboles pequeños, ya que su operación requiere conocer el peso del agua transpirada y evaporada del suelo (Howell, 2005; Meissner *et al.*, 2010). La principal desventaja radica en la complejidad que implica su empleo en árboles de gran tamaño. En las últimas décadas, se han desarrollado aproximaciones más simples basadas en la medición de la velocidad del flujo de savia ( $F_d$ ) (Granier y Gross, 1987); no obstante, su principal limitación es que se aplica de forma puntual, es decir, en un único punto del tallo del árbol, ignorando la variabilidad intrínseca del xilema a lo largo de su circunferencia. Sin embargo, una de sus ventajas es que existen varios procedimientos para extrapolar los resultados a nivel de planta (Hatton, 1990) y, posteriormente, escalarlos a nivel de la masa forestal, cuenca hidrográfica o ecosistema, según densidades de plantas y dominancia de especies (Cárdenas *et al.*, 2019). Entre las técnicas disponibles para la cuantificación de la transpiración, se ha encontrado que el análisis del flujo de savia es eficiente para estimar la transpiración del árbol y del bosque (Burgess *et al.*, 2000; Burgess *et al.*, 2001).

El flujo de savia es el movimiento de minerales, nutrientes y agua en el xilema causado por el gradiente de potencial desde el suelo (una región de alto potencial de agua) hasta la atmósfera (una región de bajo potencial de agua) (Ehsani *et al.*, 2017). Varía según la especie, la hora del día y la época del año; aumenta cuando ocurre la mayor radiación solar (al mediodía). Por tanto, durante la noche, normalmente ocurre muy poco (o nulo) flujo de savia. Además, en los días fríos y nublados, el flujo de savia disminuye debido a la menor incidencia de luz o radiación solar en las copas de los árboles (Giménez *et al.*, 2013).

Los métodos de medición del flujo de savia disponibles son térmicos, y estos lo estiman a partir de la  $F_d$  y escalando posteriormente por el área de la albura conductora ( $A_s$ ) (Quiñonez-Piñón y Valeo, 2017). Hay dos enfoques generales para determinar la  $F_d$ : por calor continuo o disipación de calor (Granier y Gross, 1987), y por pulso de calor (Marshall, 1958). La diferencia principal es que en el primero se aplica calor continuamente a una sonda (sensor), mientras se registra la diferencia de temperatura entre esta sonda y otra no calentada ubicada 10 cm más abajo en el xilema (Vandegehuchte y Steppe, 2013). La segunda aproximación se basa en la ecuación de conducción-convección de calor presentada por Marshall (1958). En este caso, el calor se aplica en pulsos de 2 a 6 segundos a través de una sonda, mientras que la diferencia de temperatura antes y después del pulso se registra en otra u otras sondas ubicadas a una distancia conocida. Estas mediciones se realizan durante un periodo mínimo de 100 segundos, y las variaciones de temperatura se emplean para determinar la  $F_d$  (Vandegehuchte y Steppe,

2013). La  $F_d$  está estrechamente relacionada con la transpiración de la planta; sin embargo, se requiere un proceso de calibración para convertir eficientemente los valores observados en tasas de transpiración efectivas.

Este estudio propone el diseño y calibración de un dispositivo de bajo costo para monitorear el flujo de savia en árboles como un indicador de la transpiración a nivel de la planta. Con este dispositivo, será posible generar información de alta calidad que permita cuantificar la cantidad de agua utilizada y requerida por las especies forestales y así lograr una producción óptima. En el estudio se emplea como material experimental plantas de *Gmelina arborea* Roxb. para la calibración y la evaluación del dispositivo. Esta es una especie de rápido crecimiento originaria del sudeste asiático, que ha sido introducida en países tropicales de América Latina (Valverde *et al.*, 2020), y actualmente es de las más importantes en los programas de reforestación en Colombia (Barrios-Trilleras *et al.*, 2021).

Los objetivos del estudio fueron: (a) diseñar y evaluar el funcionamiento de un dispositivo de bajo costo que integre un sistema de control y adquisición de datos, junto con un sensor de flujo de savia, optimizado para su uso en especies leñosas; (b) calibrar las estimaciones de velocidad de flujo de savia ( $F_d$ ) obtenidas por el dispositivo mediante comparaciones precisas con observaciones de transpiración registradas, a partir de un lisímetro de pesaje; (c) evaluar el desempeño del dispositivo en la medición de tasas de transpiración de *Gmelina arborea*, tanto en condiciones controladas de invernadero como en entornos de campo abierto.

## Metodología

### Teoría del método de la razón de calor

Para determinar la velocidad del flujo de savia se trabajó método de la razón de calor (*heat ratio method* [HRM]) (Burgess *et al.*, 2001; Forster, 2020; Marshall, 1958), el cual mide la proporción del aumento de temperatura, después de retirar un pulso térmico en puntos equidistantes aguas arriba y aguas abajo de un emisor de calor (Burgess *et al.*, 2001). La velocidad del pulso de calor se calcula como:

$$v_h = k \cdot \frac{1}{x} \cdot \ln \left( \frac{v_1}{v_2} \right) \cdot 3600 \quad (1)$$

Donde,  $v_h$  es la velocidad del pulso de calor ( $\text{cm h}^{-1}$ ),  $k$  es la difusividad térmica de la madera fresca ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ),  $x$  es la distancia entre el emisor de calor y las sondas de temperatura (generalmente 6 mm),  $v_1$  y  $v_2$  son los aumentos de temperatura aguas abajo y aguas arriba del emisor de calor, generalmente calculados entre 60 y 80 s después de retirar el pulso de calor (Burgess *et al.*, 2001).

Debido al daño causado al xilema por las sondas insertadas, la velocidad del pulso de calor ( $v_h$ ) debe corregirse. La velocidad del pulso de calor corregida ( $v_c$ ) se obtiene empleando los coeficientes de corrección propuestos por [Burgess et al. \(2001\)](#), los cuales se integran en la siguiente ecuación:

$$v_c = b \cdot v_h + c \cdot v_h^2 + d \cdot v_h^3 \quad (2)$$

Donde,  $b$ ,  $c$  y  $d$  son coeficientes que dependen del tamaño de la herida.

La velocidad del pulso de calor  $v_c$  se convierte en velocidad del flujo de savia ( $F_d$ ) a través de la ecuación:

$$F_d = \frac{\rho_b \cdot (c_w + m_c \cdot c_s)}{\rho_s \cdot c_s} \cdot v_c \quad (3)$$

Donde,  $F_d$  es la velocidad del flujo de savia ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ),  $\rho_b$  es la densidad básica de la albura ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $\rho_s$  es la densidad de la savia (asumida  $1000 \text{ kg m}^{-3}$ ),  $m_c$  es el contenido de humedad de la albura ( $\text{kg kg}^{-1}$ ),  $c_w$  y  $c_s$  es la capacidad calorífica específica de la madera seca ( $1200 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) y de la savia ( $4182 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), respectivamente ([Forster, 2020](#)).

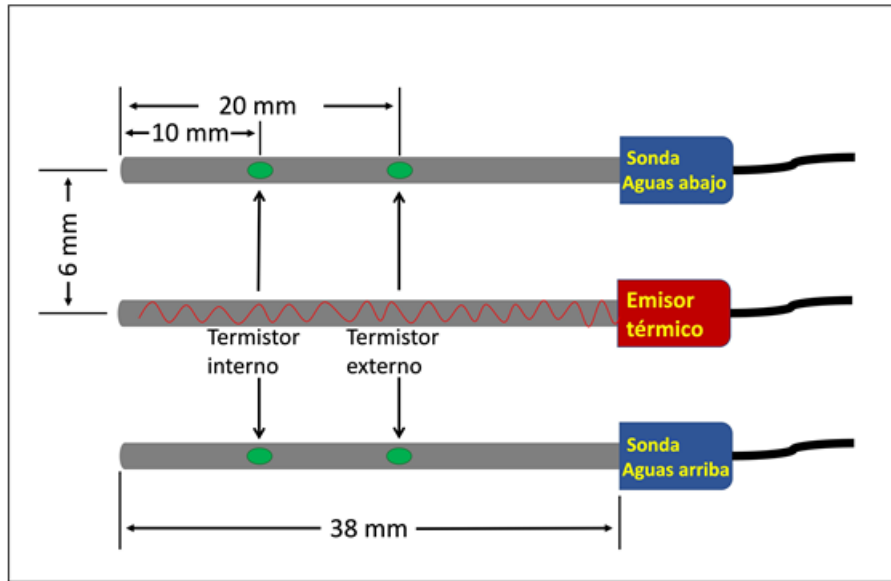
Finalmente, el volumen de savia transpirada ( $Q$ ,  $\text{L h}^{-1}$ ) por la planta se obtiene mediante el producto entre  $F_d$  y el área de la albura conductora ( $Q = F_d \cdot A_s$ ).

## Fabricación de sondas

El sensor de flujo de savia consistió en tres sondas, un emisor de calor central y dos sondas de temperatura equidistantes aguas arriba y aguas abajo del emisor de calor (6 mm). Las sondas se fabricaron con agujas de dosificación de acero inoxidable de 1,5 mm de diámetro y 38 mm de longitud. El emisor de calor se construyó con una resistencia de alambre esmaltado Ni80Cr20 de 20-25  $\Omega$  (figura 1). Cada una de las sondas de temperatura estuvo compuesta por dos termistores NTC recubiertos de resina epoxi (Lingee Sensor, China) ubicados a 10 mm y 20 mm desde la punta de la sonda (figura 1). NTC significa *negative temperature coefficient*, lo que indica que la resistencia del termistor disminuye a medida que aumenta la temperatura. El costo de construcción de un sensor de flujo de savia fue de aproximadamente USD 6.

## Sistema de control y adquisición de datos

Este se construyó en una placa de circuito impreso alrededor de un microprocesador ATmega328P (Microchip Technology Inc.) (figura 2). El emisor de calor ( $\approx 5,74 \text{ W}$ ) fue controlado por una señal digital del microprocesador a un transistor (ME60N03A, VBSemi Co.). Los termistores se midieron con un circuito puente y una resistencia de precisión de 10 k $\Omega$  (tolerancia del



**Figura 1.** Detalles de la fabricación del sensor de flujo de savia

0,1 %) como referencia y un voltaje de excitación de 2,048 V controlado por un circuito regulador de voltaje de precisión (LM4040, Texas Instruments). La señal analógica de cada termistor se recibió en uno de los ocho canales disponibles de un multiplexor analógico (74HC4051D, NXP Semiconductors). Las señales analógicas se convirtieron en señales digitales por medio de un convertidor analógico-digital de 16 bits de resolución (ADS1110, Texas Instruments), y posteriormente se convirtieron en voltaje. Luego, se calculó la resistencia de cada termistor utilizando la siguiente fórmula de divisor de voltaje:

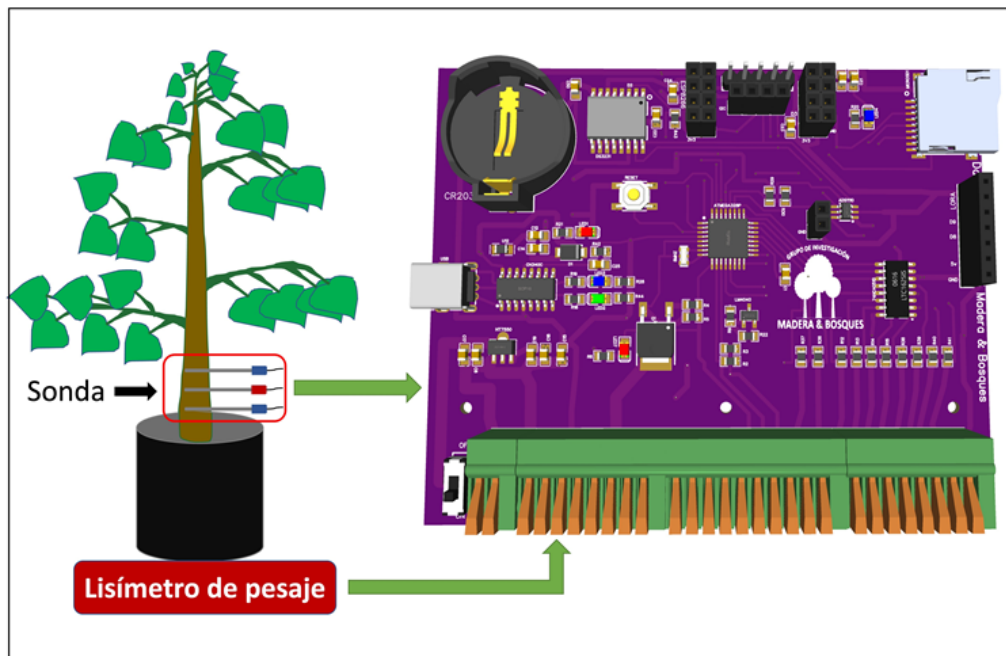
$$R_T = R_{Ref} \left( \frac{V_{Entrada}}{V_{Salida}} - 1 \right) \quad (4)$$

Donde,  $R_T$  es la resistencia del termistor en  $\Omega$ ,  $R_{Ref}$  es la resistencia de referencia (10 k $\Omega$ ), y  $V_{Entrada}$  y  $V_{Salida}$  es el voltaje de entrada (2,048 V) y de salida al divisor de voltaje (medido por el dispositivo).

Los valores de resistencia ( $R_T$ ) se convirtieron en temperatura en grados Celsius, con la ecuación de Steinhart-Hart (Steinhart y Hart, 1968):

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R_T) + C \cdot (\ln(R_T))^3 \quad (5)$$

Donde,  $T_K$  es la temperatura del termistor en Kelvin,  $R_T$  es la resistencia del termistor, y  $A$ ,  $B$  y  $C$  son coeficientes proveídos por el fabricante. Para convertir la temperatura de Kelvin a grados Celsius se trabajó la relación  $T^{\circ}C = T_K - 273,15$ .



**Figura 2.** Detalles de la placa de circuito impreso del sistema de control y adquisición de datos, y configuración para la calibración del dispositivo

La placa del circuito impreso se diseñó con el *software* abierto *EasyEDA* ([EasyEDA, 2023](#)), y el *software* para el sistema de control y adquisición de datos se programó con *Arduino IDE*, v. 2.1.1 ([Arduino, s. f.](#)). El costo de los materiales para la construcción del sistema de control y adquisición de datos fue de aproximadamente USD 100.

El ciclo de trabajo del dispositivo se configuró para una medición inicial de las sondas de temperatura durante 10 s; luego se aplicó un pulso térmico durante 5 s; posteriormente, se continuó registrando las sondas de temperatura durante 100 s adicionales; por último, el dispositivo entró en hibernación durante 15 min (900 s) y reinició el ciclo. Se obtuvieron y registraron marcas de tiempo con un reloj en tiempo real (DS3231, Maxim Integrated TM). Todos los datos se almacenaron en una tarjeta microSD en un archivo con extensión .csv.

### Evaluación del consumo de energía del dispositivo

Se llevó a cabo una evaluación del consumo de energía del dispositivo, para lo cual se midió la corriente (mA) por medio de un sensor de corriente (INA229, Texas Instruments), conectado a una placa Arduino UNO Rev3 (Arduino LLC). El dispositivo fue alimentado con tres baterías de litio NCR18650B con una capacidad de 3400 mAh conectadas en serie, que proporcionaban un voltaje de  $\sim 12$  V.

Durante la prueba, se monitoreó la corriente a lo largo de 33 ciclos de trabajo para obtener datos detallados sobre el consumo de energía en cada componente del ciclo operativo del dispositivo. El objetivo era identificar los patrones de consumo y determinar la eficiencia energética del sistema en condiciones reales de funcionamiento.

## Evaluación del dispositivo en invernadero

El experimento de calibración se efectuó en condiciones de invernadero en un sitio a 1100 m s. n. m. en Ibagué (Colombia). Para la calibración se utilizaron cuatro plantas jóvenes de *Gmelina arborea* de un año de edad con diámetro de cuello de 3,89-4,51 cm y altura promedio de 2,0 m cultivadas en macetas de 20 L llenas de sustrato homogéneo (tabla 1).

**Tabla 1.** Descripción del material experimental de *Gmelina arborea* utilizado para la calibración

Planta	Diámetro de cuello (cm)	Área de albura (cm <sup>2</sup> )	Densidad básica (kg m <sup>-3</sup> )	Contenido de humedad (kg kg <sup>-1</sup> )
1	3,89	11,95	487,49 ± 18,16	1,165 ± 0,061
2	4,51	16,01	471,20 ± 8,14	1,283 ± 0,037
3	4,04	12,81	444,78 ± 8,71	1,321 ± 0,045
4	4,20	13,86	438,98 ± 9,37	1,383 ± 0,035
Promedio	4,16	13,65	460,61 ± 22,94	1,288 ± 0,092

La evaluación consistió en la comparación de la  $F_d$  obtenida simultáneamente a través del dispositivo desarrollado y la  $F_d$  medida por un lisímetro de pesaje (figura 2), el cual consistió en una celda de carga de 50 kg con una precisión de aproximadamente 0,1 g conectada directamente al dispositivo (sistema de adquisición).

Antes de cada medición, el sustrato de las macetas se saturó con agua hasta capacidad de campo y luego se cubrió con un aislante de plástico para evitar la pérdida de agua por evaporación. Luego, el dispositivo inició la recolección de información, y registró los aumentos de temperatura aguas abajo y aguas arriba del emisor de calor ( $v_1$  y  $v_2$ ), y la pérdida de peso (transpiración observada) obtenida del lisímetro de pesaje. La medición se realizó cada 15 minutos durante 3-5 días consecutivos, o hasta que la planta mostrara un estrés hídrico evidente en las hojas. El mismo proceso se repitió hasta alcanzar un periodo de medición de ~ 15-20 días para cada planta. Al final del experimento, se cortaron las plantas, y se extrajeron cuatro discos de ~ 3-4 cm de grosor de cada planta para determinar su área de albura conductora ( $A_s$ ), densidad básica ( $\rho_s$ ) y contenido de humedad ( $m_c$ ) de la albura, según la norma American Society for Testing y Materials (ASTM, 2017).

El  $A_s$  se evaluó visualmente, y debido a que no observó una formación distintiva de duramen, el  $A_s$  se definió como el área de circunferencia total alrededor del cuello de la planta, que oscilaba entre 11,95 cm<sup>2</sup> y 16,01 cm<sup>2</sup>. La  $\rho_s$  promedio de la albura varió entre 438,98 y 487,49 kg m<sup>-3</sup>, con una media de 460,61 kg m<sup>-3</sup>, mientras que el  $m_c$  de las muestras frescas osciló entre 1,165 y 1,383 kg kg<sup>-1</sup>, con una media de 1,288 kg kg<sup>-1</sup> (tabla 1).

Con la información obtenida se calcularon valores horarios de  $v_c$ ,  $F_d$ ,  $Q$  y de transpiración observada a partir del lisímetro de pesaje, promediando los valores registrados cada 15 minutos. La transpiración registrada mediante el lisímetro de pesaje se convirtió en  $F_d$  observada, dividida en el  $A_s$  de cada planta.

### Calibración y análisis de datos

Para todos los análisis de datos se trabajó el paquete estadístico *R* versión 4.3.2 ([R Core Team, 2024](#)). Después de una cuidadosa revisión y depuración de datos, se dispuso de un total de 68 días de datos para el análisis y la calibración del dispositivo. Se utilizó una prueba *t* para muestras pareadas para comparar las medias entre la  $F_d$  observada (lisímetro) y  $F_d$  estimada (dispositivo). Además, se utilizaron métricas para evaluar la precisión del sistema de medición del flujo de savia, como el error medio (EM), el error absoluto medio (EAM) y la raíz del error cuadrático medio (REMC), y el índice de Willmott (IW) para determinar hasta qué punto las estimaciones del dispositivo coinciden con los datos observados por el lisímetro de pesaje. Las fórmulas utilizadas fueron las siguientes:

$$EM = n^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (6)$$

$$EAM = n^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (7)$$

$$REMC = \sqrt{n^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (8)$$

$$IW = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{y}_i - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|)^2} \quad (9)$$

Donde,  $y_i$  e  $\hat{y}_i$  son la  $F_d$  observada y estimada, respectivamente,  $\bar{y}$  es la  $F_d$  observada media, y  $n$  el número de observaciones.

La calibración del dispositivo se efectuó mediante el ajuste de un modelo de regresión lineal simple, y con la ecuación  $y_i = b \cdot x_i$ , donde  $y_i$  representa los valores de  $F_d$  de referencia obtenidos del lisímetro de pesaje;  $x_i$ , los de  $F_d$  con el dispositivo; y el coeficiente  $b$  es la pendiente del modelo. Para el ajuste del modelo se utilizó regresión ponderada, la cual asigna pesos variables a cada observación en función de su varianza para mitigar el impacto de la heterocedasticidad (Kutner *et al.*, 2005).

Para evaluar la precisión y la capacidad de generalización del modelo de regresión lineal simple, se empleó validación cruzada. Este proceso implicó ajustar iterativamente el modelo  $n$  veces, entrenándolo cada vez con datos de  $n - 1$  días y reservando los datos de un día para la validación (Hastie *et al.*, 2009). A partir de la validación cruzada, se obtuvieron la media y los intervalos de confianza para el coeficiente de regresión ( $b$ ), determinados como los percentiles 2,5 y 97,5 de la distribución del coeficiente.

La media del coeficiente de los modelos obtenidos a través de la validación cruzada, (" $b$ "), sirvió como factor de calibración para ajustar las mediciones del dispositivo para que coincidieran con las del lisímetro de pesaje. Una vez determinado el factor de calibración, se calibró  $F_d$ , seguida del recálculo de todas las métricas mencionadas anteriormente.

### **valuación del dispositivo en campo**

El dispositivo desarrollado se probó en condiciones de campo en una plantación forestal de *Gmelina arborea* de 6 años y una densidad de 1333 árboles  $\text{ha}^{-1}$  en Armero-Guayabal, Tolima (Colombia). El dispositivo fue acondicionado para funcionar con tres baterías de litio NCR18650B de 3400 mAh conectadas en serie ( $\sim 12$  V).

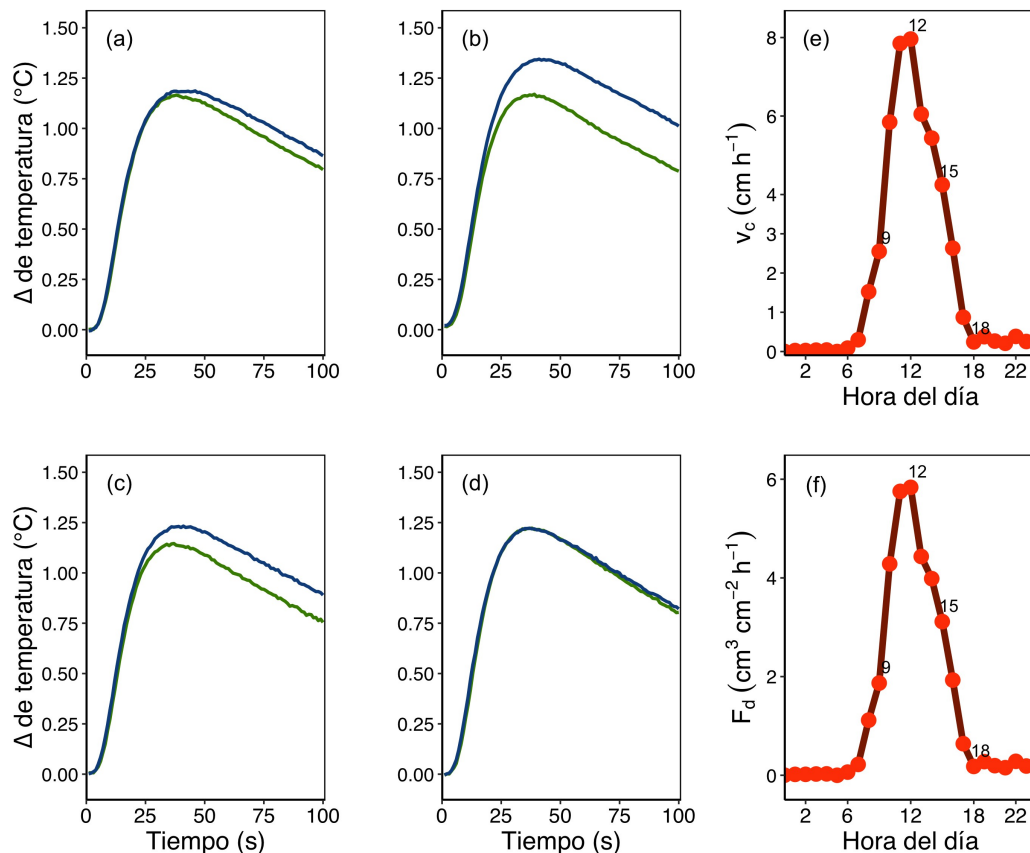
La evaluación se efectuó en un árbol de 21,5 cm de diámetro a 1,3 m sobre el suelo y un  $A_s = 171,07 \text{ cm}^2$ . El periodo de medición incluyó 12 días desde el 17 al 28 de noviembre de 2023. Los valores de  $Q$  se convirtieron en transpiración ( $\text{mm día}^{-2}$ ); se dividió  $Q$  en la superficie de terreno ocupado por el árbol ( $a = 7,5 \text{ m}^2$ ) (González-García *et al.*, 1995). Estos valores de transpiración fueron comparados con la evapotranspiración potencial ( $ET_0$ ) del sitio, calculada a partir de datos provenientes de una microestación meteorológica instalada a 200 m, con el método de FAO-Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006).



## Resultados

### Operación del dispositivo

La figura 3 ilustra el proceso del dispositivo para obtener  $F_d$ . Las figuras 3a -3d muestran los aumentos de temperatura promedio después de la aplicación de un pulso de calor, registrados por el dispositivo en diferentes momentos del día (día del año = 229). Las figuras 3a-3d muestran un comportamiento creciente en los aumentos de temperatura hasta alcanzar un máximo entre 25 s y 50 s después de retirar el pulso de calor, y luego disminuir linealmente. El sistema de adquisición de datos permitió la medición de variaciones de temperatura de aproximadamente  $0,004\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 3.** Aumentos de temperatura promedio en las sondas aguas arriba (líneas verdes) y aguas abajo (líneas azules)

**Nota:** datos después de retirar el pulso de calor medido a las 9 (a), 12 (b), 15 (c) y 18 (d) horas del día del año 229 y  $v_c$  (e) y  $F_d$  calculada durante el mismo día del año (f).

Los aumentos de temperatura entre 60 s y 80 s sirvieron para calcular las razones de temperatura que posteriormente se convirtieron en  $v_c$ , con la aplicación de las ecuaciones (1) y (2) (figura 3e); y finalmente se convirtieron en  $F_d$  con la ecuación (3) (figura 3f). La  $v_c$  y  $F_d$  tendieron a ser bajas en la madrugada, luego aumentaron a un máximo al mediodía y disminuyeron por la tarde, y en la noche, alcanzaron valores similares a los registrados en la madrugada.

### Consumo de energía del dispositivo

La tabla 2 muestra el consumo de energía del dispositivo en distintos componentes de su ciclo de trabajo, medido en miliamperios (mA) durante 33 ciclos. La fase de aplicación del pulso térmico fue la de mayor consumo energético, con un promedio de 536,012 mA y una desviación estándar de 9,801 mA. En contraste, la fase de hibernación presentó el menor consumo, con un promedio de 3,671 mA y una baja variabilidad (desviación estándar de 0,273 mA), lo que indicó un comportamiento estable y eficiente en este estado. Las fases de medición inicial y medición posterior (antes y después del pulso térmico) tuvieron consumos moderados, con valores promedio de 7,736 mA y 8,780 mA respectivamente, lo cual mostró una consistencia razonable en su consumo energético.

El dispositivo presenta un consumo energético promedio de aproximadamente 6,84 mAh, basado en los datos obtenidos de la medición del consumo en distintos componentes de su ciclo de trabajo. Para cada ciclo de trabajo individual, el consumo de energía se estimó en 1,9285 mAh, considerando una duración total de ciclo de trabajo de aproximadamente 1015 s. Esto significó que, en una hora, el dispositivo completó aproximadamente 3,546 ciclos de trabajo. Este ciclo incluyó periodos de medición inicial, pulso térmico, medición posterior e hibernación.

**Tabla 2.** Consumo de energía por ciclo de trabajo del dispositivo

Componente	Duración (s)	Consumo de energía (mA)	
		Media	Desviación estándar
Medición inicial	10	7,736	0,279
Pulso térmico	5	536,012	9,801
Medición posterior	100	8,780	4,189
Hibernación	900	3,671	0,273

**Nota:** información generada a partir de la medición de  $n = 33$  ciclos de trabajo ejecutados.

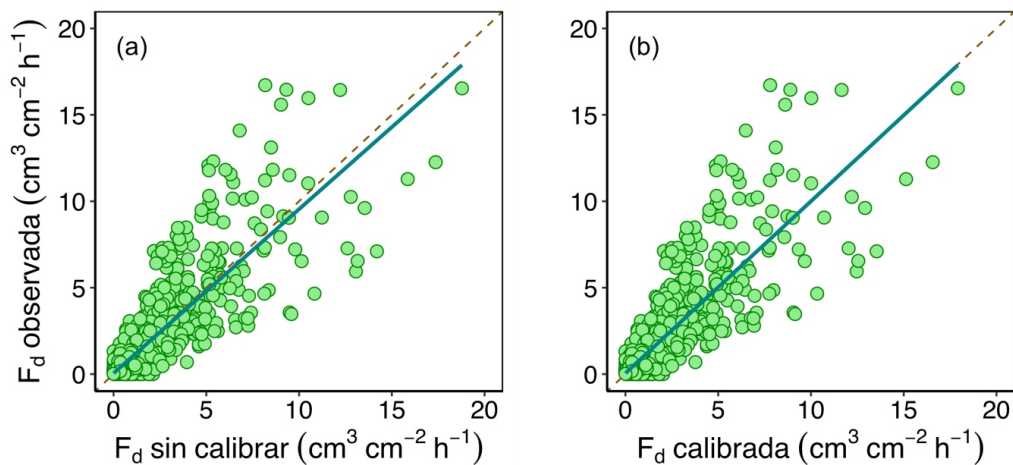
Utilizando tres baterías de litio CR18650B conectadas en serie, cada una con una capacidad nominal de 3400 mAh y un voltaje combinado de  $\sim 12$  V, y considerando un consumo promedio

de energía de 6,84 mAh, los cálculos indican que el dispositivo podría operar sin problemas durante aproximadamente 20 días continuos con esta configuración.

### Calibración y evaluación del dispositivo en invernadero

La  $F_d$  sin calibrar obtenida por el dispositivo demostró ser una estimación confiable de la  $F_d$  observada obtenida con el lisímetro. Esto se respalda con las siguientes métricas: EM = - 0,031  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ , EAM = 0,755  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ ; REMC = 1,296  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ , y un IW cercano a uno (0,90) (tabla 3). Adicionalmente, una prueba  $t$  para muestras pareadas reveló que la  $F_d$  estimada (sin calibrar) obtenida a través del dispositivo no fue significativamente diferente ( $p > 0,05$ ) de la  $F_d$  medida a través del lisímetro de pesaje (tabla 3).

Los datos de  $F_d$  sin calibrar obtenidos de las mediciones en cuatro plantas de *Gmelina arborea* se muestran en la figura 4a junto con la  $F_d$  observada. Como se observa, la relación entre las dos variables es lineal, con un  $R^2 = 0,791$  (figura 4a). Los datos sugieren que el dispositivo tiende a sobrestimar las  $F_d$  máximas (figura 4a). El coeficiente de la línea de regresión que sirve como factor de calibración se determinó como  $b = 0,954051$  (intervalo de confianza: 0,946800-0,962952).



**Figura 4.** Velocidad del flujo de savia ( $F_d$ ) observada versus  $F_d$  sin calibrar (a) y calibrada (b)

**Nota:** las líneas discontinuas representan la relación diagonal 1:1, mientras que la línea turquesa representa una línea de regresión ajustada.

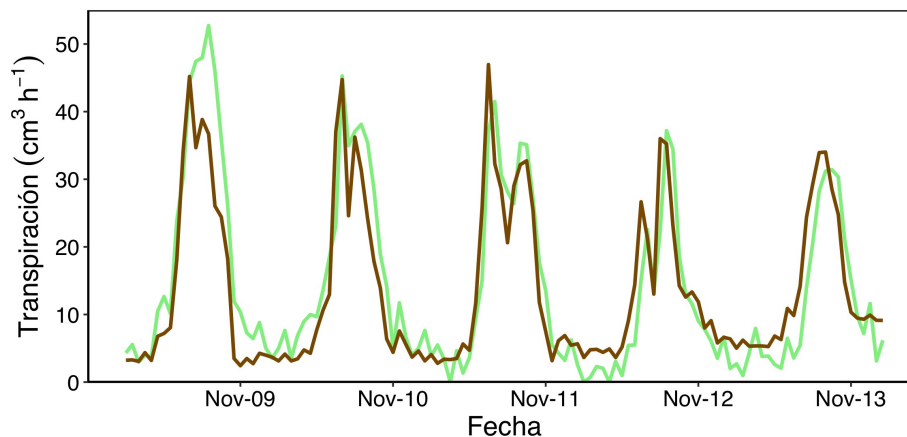
La figura 4b muestra la  $F_d$  después de aplicar el factor de calibración, lo cual indica una corrección de la tendencia de sobrestimación observada en la figura 4a. Además, corrige el lige-

**Tabla 3.** Estadísticas de evaluación para la velocidad del flujo de savia ( $F_d$ ) sin calibrar y calibrada

Estadísticos	Velocidad del flujo de savia ( $F_d$ )	
	Sin calibrar	Calibrada
Prueba $t$ pareada (valores $t$ de Student)	0,914 <sup>ns</sup>	0,553 <sup>ns</sup>
Error medio ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ )	-0,031	0,018
Error absoluto medio ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ )	0,755	0,745
Raíz del error medio cuadrático ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ )	1,296	1,292
Índice de Willmott (IW)	0,900	0,903

**Nota:** *ns* es no significativo para  $\alpha = 0,05$ .

ro sesgo ilustrado en la figura 4a, lo que resulta en que la línea de regresión ahora siga de cerca la diagonal 1:1. La aplicación del factor de calibración resultó en mejoras en todas las métricas de evaluación: una reducción del 41,9 % en el EM, una disminución del 1,3 % en el EAM, una reducción del 0,3 % en el REMC y un aumento del 0,3 % en el IW (tabla 3). Estos resultados subrayan la consistencia y correspondencia entre los valores de  $F_d$  obtenidos con el dispositivo y los observados con el lisímetro.



**Figura 5.** Transpiración observada (línea marrón) y  $Q$  medido con el dispositivo (verde claro) para una planta de *Gmelina arborea* medida durante cinco días consecutivos en noviembre de 2023

A partir de los valores calibrados de  $F_d$ , se observó que las plantas de *Gmelina arborea* presentaron  $v_c$  relativamente bajas con media de  $2,25 \text{ cm h}^{-1}$ , con un rango amplio de  $0 \text{ cm h}^{-1}$  a  $25,62 \text{ cm h}^{-1}$ . De manera similar, la  $F_d$  varió de 0 a  $18,21 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$  con media de  $1,58 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ .

Los datos de  $F_d$  calibrados se multiplicaron por el  $A_s$  de cada planta y se obtuvo el volumen de flujo de savia ( $Q$ ) (figura 5). En la figura 5 se observa una alta correspondencia entre los valores de transpiración obtenidos mediante el lisímetro y los de  $Q$  mediante el dispositivo desarrollado.

### Evaluación del dispositivo en campo

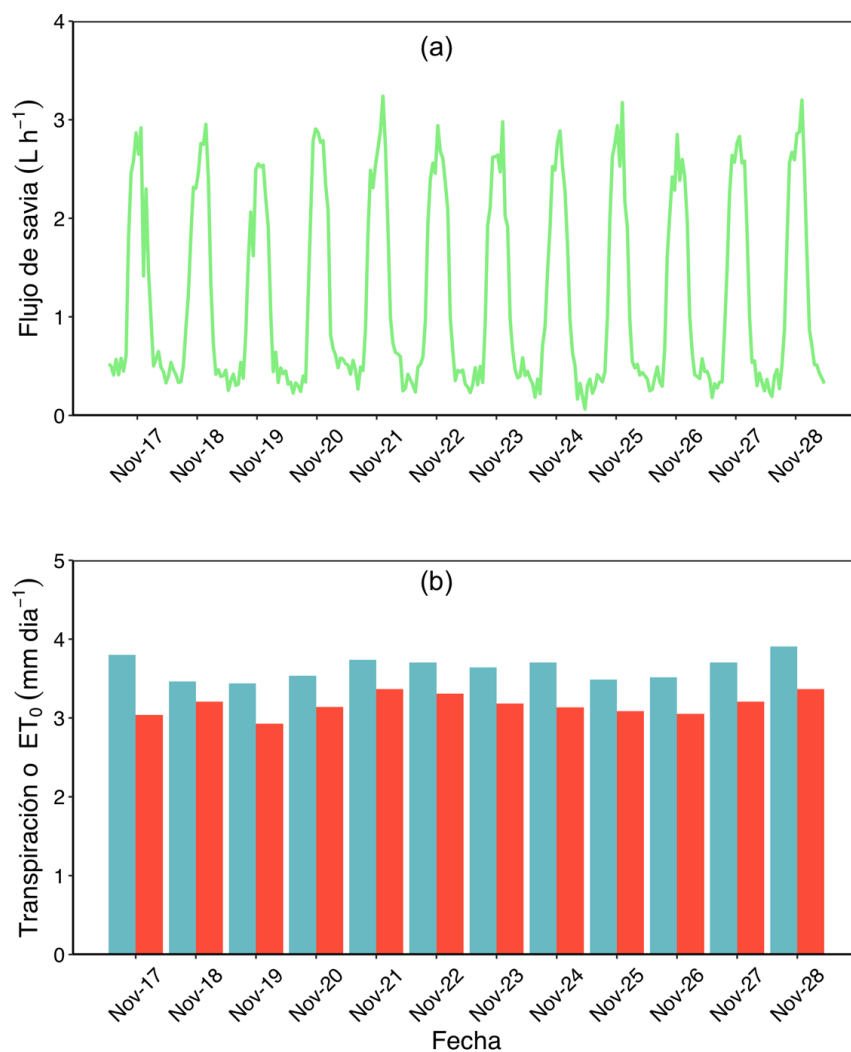
La evaluación realizada en campo en un árbol de *Gmelina arborea* durante 12 días mostró una  $v_c$  media de  $9,38 \text{ cm h}^{-1}$ , con valores mínimos y máximos promedio de  $1,82 \text{ cm h}^{-1}$  y  $23,35 \text{ cm h}^{-1}$ , respectivamente. La  $F_d$  alcanzó un valor medio de  $6,93 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , con un rango promedio entre  $1,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$  y  $17,26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . El volumen de flujo de savia ( $Q$ ) promedió  $1,19 \text{ L h}^{-1}$ , con un rango promedio entre  $0,23$  y  $2,95 \text{ L h}^{-1}$  (figura 6a). Tras sumar estos valores a diario, se encontró que la  $F_d$  presentó una media de  $166,39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ , con un rango promedio entre  $155,89$  y  $179,96 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ . Mientras que  $Q$  mostró valores medios de  $28,46 \text{ L día}^{-1}$ , con un rango promedio entre  $26,67 \text{ L día}^{-1}$  y  $30,79 \text{ L día}^{-1}$ .

Los valores de transpiración diaria variaron entre  $2,93 \text{ mm día}^{-1}$  y  $3,37 \text{ mm día}^{-1}$ , con una media de  $3,17 \text{ mm día}^{-1}$ . Asimismo, la  $ET_0$  varió entre  $3,44 \text{ mm día}^{-1}$  y  $3,91 \text{ mm día}^{-1}$ , con una media de  $3,64 \text{ mm día}^{-1}$  (figura 6b). Como se observa en la figura 6b, existe una alta concordancia entre los valores de transpiración y  $ET_0$ , además, se aprecia que los de transpiración nunca superaron los de  $ET_0$  durante el periodo de medición.

### Discusión

El estudio presenta el diseño y evaluación de un dispositivo de bajo costo para monitorear el flujo de savia de especies leñosas, como un equivalente de la transpiración a nivel de planta. Entre los métodos disponibles para cuantificar la transpiración, la medición de las tasas de flujo de savia se ha destacado como un enfoque eficiente para estimar la transpiración del árbol completo y, posteriormente, extrapolarla a todo el bosque (Burgess *et al.*, 2001).

El dispositivo desarrollado presentó un comportamiento estable y apropiado, con la capacidad de detectar las variaciones en temperatura asociadas a las variaciones en los flujos de savia en diferentes momentos del día. El comportamiento de la velocidad del pulso de calor ( $v_c$ ) concuerda con lo reportado en estudios previos; muestra máximos de  $v_c$  al mediodía y valores bajos durante la noche (Dawson *et al.*, 2007). El sistema de adquisición de datos permitió la medición de variaciones de temperatura de aproximadamente  $0,004 \text{ }^\circ\text{C}$ . Estudios previos han mostrado que configuraciones de dispositivos de bajo costo son capaces de medir cambios de hasta  $0,002 \text{ }^\circ\text{C}$  (Cárdenas *et al.*, 2019; Miner *et al.*, 2017).



**Figura 6.** Volumen de flujo de savia diario ( $Q$ ) (a) y transpiración diaria medida con el dispositivo (barras color rojo) en un árbol de *Gmelina arborea* (b) y comparación entre la  $ET_0$  diaria (barras color cian)

**Nota:** determinada por el método de FAO-Penman-Monteith para un periodo de 12 de días en noviembre de 2023.

En términos generales, el dispositivo presenta un bajo consumo de energía promedio de 6,84 mAh; sin embargo, el dispositivo experimenta variaciones significativas en su consumo de energía según la fase del ciclo de trabajo. [Beslity et al. \(2022\)](#) reportaron para un dispositivo basado en Arduino un consumo promedio durante la fase de medición de temperatura de 30 mA, el cual es mayor al reportado en el presente estudio. Asimismo, [Sebastian \(2020\)](#) reporta consumos entre 5,2 mA hasta 94,2 mA para dispositivos Arduino basados en el microprocesador ATmega328, dependiendo de su configuración. Similar a estudios previos, el pulso térmico emerge como el componente con el consumo más alto ([Beslity et al., 2022](#)). El pulso térmico demanda una gran cantidad de energía para poder emitir suficiente calor para que sea detectado por las sondas de temperatura ([Beslity et al., 2022](#); [Gutiérrez et al., 2021](#)). El análisis sugiere que el dispositivo podría funcionar con baterías por espacios de tiempo prologados, dependiendo del tipo de batería utilizada.

El proceso de calibración demostró la fiabilidad del dispositivo desarrollado, mostrando una relación lineal  $R^2 = 0,791$  entre los valores de  $F_d$  observados en plantas jóvenes de *Gmelina arborea* a través del lisímetro de pesaje y los obtenidos por el dispositivo desarrollado. Estudios previos han reportado  $R^2$  entre 0,54 a 0,92 en la determinación de las tasas de transpiración en especies leñosas, con el método HRM ([Cárdenas et al., 2019](#); [Forster, 2017, 2020](#)). La pendiente del modelo lineal simple estimado sugiere que el dispositivo tiende a sobrestimar los valores de  $F_d$ ; sin embargo, la aplicación de un factor de calibración mejoró significativamente la concordancia entre las mediciones del dispositivo y las del lisímetro. Estos hallazgos corroboran estudios previos que han reportado que el método HRM tiende a sobrestimar las tasas de transpiración, para lo cual se requiere de un proceso de calibración adecuado ([Forster, 2017](#)). El empleo de un lisímetro de pesaje mostró ser un método robusto para calibrar las estimaciones del dispositivo, y permitió obtener información importante sobre la precisión y confiabilidad del dispositivo. Esta técnica de evaluación ha sido probada en otras especies, y ha arrojado resultados satisfactorios ([Deng et al., 2021](#); [Forster, 2020](#)).

Según los resultados, los valores de  $F_d$  obtenidos mediante el dispositivo desarrollado no registraron diferencias estadísticamente significativas en relación con los  $F_d$  medidos directamente por el lisímetro de pesaje. Esta observación subraya la confiabilidad y precisión del sensor de flujo de savia en capturar la dinámica de la transpiración; lo cual valida su utilidad en la medición de la transpiración de las plantas.

El método HRM demostró ser eficiente en la estimación de la  $F_d$  de plantas de *Gmelina arborea*. Según estudios, funciona bien en la medición de tasas de transpiración bajas ([Burgess y Dawson, 2004](#); [Burgess et al., 1998](#); [Forster, 2020](#); [Gutiérrez et al., 2021](#)). Generalmente, se asume que el método HRM tiene un límite superior teórico para medir la  $v_c$  entre 15 cm h<sup>-1</sup> y

54 cm h<sup>-1</sup>, dependiendo la distancia entre las sondas (Burgess *et al.*, 2001; Forster, 2020; Green *et al.*, 2009). Este método resultó ser el más adecuado para la medición del flujo de savia de *Gmelina arborea*, la cual presentó vc máximas de 25,62 cm h<sup>-1</sup>, debido a su capacidad para detectar y registrar con precisión los valores bajos de flujo de savia que caracterizan a esta especie.

Los valores de  $F_d$  registrados en el estudio obtenidos en plantas jóvenes y un árbol adulto de *Gmelina arborea* son similares a los reportados para la especie creciendo en plantaciones en Panamá y Filipinas, pero medidas utilizando el método de disipación de calor (Dierick y Hölscher, 2009; Kunert *et al.*, 2010). Los autores registraron  $F_d$  máximas de 20 cm<sup>3</sup> cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> para plantaciones en Panamá y de 17,1 cm<sup>3</sup> cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> en Filipinas, muy similares a las reportadas en el presente estudio, 18,21 cm<sup>3</sup> cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> y 17,26 cm<sup>3</sup> cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> en plantas jóvenes de un año de edad y en un árbol adulto de 6 años, respectivamente. Este resultado confirma la confiabilidad del dispositivo para registrar las variaciones en el flujo de savia en árboles de diferentes edades y condiciones ambientales.

La consistencia entre la transpiración medida y la evapotranspiración potencial calculada, respaldada por estudios previos (Miner *et al.*, 2017), demuestra la precisión del sistema desarrollado. Este hallazgo evidencia la relación esperada entre la transpiración y la evapotranspiración potencial, ambas influenciadas por factores ambientales compartidos como temperatura, humedad relativa, déficit de presión de vapor, radiación solar y velocidad del viento (Zeppel *et al.*, 2004).

Estudios previos han expuesto que la densidad y el contenido de humedad de la madera pueden afectar la conductividad hidráulica de la planta y, consecuentemente, las tasas de transpiración (Ferdous *et al.*, 2023; Looker *et al.*, 2016; Markesteijn *et al.*, 2011). La densidad básica media observada, 460,61 kg m<sup>-3</sup>, se encuentra dentro del rango de 428 a 482 kg m<sup>-3</sup> y de 338,2 a 534,7 kg m<sup>-3</sup> reportados en estudios genéticos para la especie en Colombia (López-Aguirre y Barrios-Trilleras, 2023; López-Aguirre *et al.*, 2024). Así mismo, el contenido de humedad promedio de la madera fresca de *Gmelina arborea* fue de 1,288 kg kg<sup>-1</sup>, muy similar al encontrado por González-Lozano y López-Rozo (2021) para la especie en Colombia, quienes reportaron una media de 1,3281 kg kg<sup>-1</sup> con un rango de 0,7277 kg kg<sup>-1</sup> a 2,0083 kg kg<sup>-1</sup>. Estudios previos con otras especies han mostrado que el contenido de humedad puede oscilar desde un mínimo del 30 % (0,3 kg kg<sup>-1</sup>) hasta más del 200 % (2,0 kg kg<sup>-1</sup>) (Glass y Zelinka, 2010).

El dispositivo generó información a muy bajo costo sobre los requerimientos hídricos de especies forestales, lo que es de gran utilidad para guiar decisiones de manejo forestal y silvicultura, especialmente en el contexto de un clima cambiante. Contar con herramientas precisas es fundamental para adquirir una comprensión más profunda de la transpiración en los bos-



ques y su relación con los factores climáticos que la controlan.

No obstante, una posible limitación de este estudio podría ser la falta de evaluación del desempeño del dispositivo en un rango más amplio de especies y de condiciones ambientales. Aunque la prueba en campo ofreció resultados satisfactorios, sería relevante llevar a cabo pruebas adicionales en diversas especies y entornos climáticos para ampliar la validez del dispositivo en condiciones de campo.

## Conclusiones

El dispositivo de bajo costo diseñado y evaluado para monitorear el flujo de savia en especies leñosas demostró un comportamiento estable y adecuado. Pudo detectar con precisión las variaciones de temperatura asociadas al flujo de savia, como se evidenció en las mediciones realizadas durante diferentes momentos del día. La capacidad del sistema de adquisición de datos para medir variaciones de temperatura mínimas, hasta 0,004 °C, fue esencial para su efectividad. Además, el análisis del consumo de energía reveló su eficiencia energética, con un bajo consumo promedio de 6,84 mAh. Aunque experimentó variaciones significativas durante el ciclo de trabajo, con el pulso térmico como el componente de mayor demanda energética, su funcionamiento global respaldó su viabilidad para operar durante periodos prolongados usando baterías.

El proceso de calibración, a partir de mediciones obtenidas mediante un lisímetro de pesaje como referencia, validó la precisión del dispositivo en la estimación del flujo de savia. La prueba exitosa del dispositivo en una plantación forestal, en un árbol de *Gmelina arborea*, complementó la validez de su aplicación en condiciones reales de campo. La consistencia entre las mediciones en invernadero y en campo respaldó su utilidad en el monitoreo de especies forestales en diferentes contextos ambientales.

El dispositivo desarrollado constituye una herramienta económica y precisa para medir el flujo de savia en especies forestales, diseñado para ser accesible a la comunidad científica, académica y gestores de recursos naturales. Su diseño, códigos y manual estarán disponibles de forma abierta para facilitar su replicación, ajuste y mejora. Se sugiere probarlo en más especies y entornos para ampliar su aplicabilidad y robustez en la investigación y gestión forestal.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Oficina de Investigación y Desarrollo Científico de la Universidad del Tolima por el apoyo financiero otorgado para desarrollar la investigación a través

del proyecto n.º 380120. También agradecen el apoyo ofrecido por el grupo de investigación Madera & Bosques de la Universidad del Tolima.

## Referencias

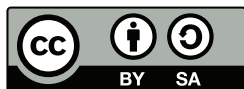
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8802ddc9-86b6-4f13-96b7-4871dd3aee65/content>
- Arduino. (s. f.). *Arduino IDE (versión 2.1.1)*. <https://www.arduino.cc/en/software>
- American Society for Testing y Materials (ASTM). (2017). D-2395-17: *Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials*. <https://doi.org/10.1520/D2395-17>
- Barrios-Trilleras, A., López-Aguirre, A. M. y Báez-Aparicio, C. A. (2021). Modelamiento de la productividad de Gmelina arborea Roxb. con base en variables biofísicas y de rodal. *Colombia Forestal*, 24(1), 71-87. <https://doi.org/10.14483/2256201X.15345>
- Beslity, J., Shaw, S. B., Drake, J. E., Fridley, J., Stella, J. C., Stark, J. y Singh, K. (2022). A low cost, low power sap flux device for distributed and intensive monitoring of tree transpiration. *HardwareX*, 12, e00351. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00351>
- Bhattacharya, A. (2019). *Changing climate and resource use efficiency in plants*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04681-5>
- Burgess, S. S. O. y Dawson, T. E. (2004). The contribution of fog to the water relations of *Sequoia sempervirens* (D. Don): Foliar uptake and prevention of dehydration. *Plant, Cell & Environment*, 27, 1023-1034. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2004.01207.x>
- Burgess, S. S. O., Adams, M. A. y Bleby, T. M. (2000). Measurement of sap flow in roots of woody plants: A commentary. *Tree Physiology*, 20(13), 909-913. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.13.909>
- Burgess, S. S. O., Adams, M. A., Turner, N. y Chin, K. O. (1998). The redistribution of soil water by tree root systems. *Oecologia*, 115, 306-311. <https://doi.org/10.1007/s004420050521>
- Burgess, S. S. O., Adams, M. A., Turner, N. C., Beverly, C. R., Ong, C. K., Khan, A. A. H. y Bleby, T. M. (2001). An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology*, 21, 589-498. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.9.589>

- Cárdenas, M. F., López-Ramírez, C., Mejía, J. D. y Escobar, J. F. (2019). Design and implementation of a low-cost device for measuring sap flow in woody species. *DYNA*, 86(208), 214-202. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.72039>
- Dawson, T. E., Burgess, S. S. O., Tu, K. P., Oliveira, R. S., Santiago, L. S., Fisher, J. B., Simonin, K. A. y Ambrose, A. R. (2007). Nighttime transpiration in woody plants from contrasting ecosystems. *Tree Physiology*, 27(4), 561-575. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.4.561>
- Deng, Z., Vice, H. K., Gilbert, M. E., Adams, M. A. y Buckley, T. N. (2021). A double-ratio method to measure fast, slow and reverse sap flows. *Tree Physiology*, 41(12), 2438-2453. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab081>
- Dierick, D. y Hölscher, D. (2009). Species-specific tree water use characteristics in reforestation stands in the Philippines. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(8), 1317-1326. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.03.003>
- EasyEDA. (2023). *EasyEDA*, versión 6.4.19. <https://easyeda.com>
- Ehsani, R., Alizadeh, A. y Kadyampakeni, D. (2017). Monitoring tree health using water-uptake rate. [https://crec.ifas.ufl.edu/media/crecifasufledu/new-site/documents/research/Monitoring-tree-health-using-water-uptake-rate-\(July\)-.pdf](https://crec.ifas.ufl.edu/media/crecifasufledu/new-site/documents/research/Monitoring-tree-health-using-water-uptake-rate-(July)-.pdf)
- Ferdous, J., Islam, M. y Rahma, M. (2023). The role of tree size, wood anatomical and leaf stomatal traits in shaping tree hydraulic efficiency and safety in a South Asian tropical moist forest. *Global Ecology and Conservation*, 43, e02453. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02453>
- Forster, M. A. (2017). How reliable are heat pulse velocity methods for estimating tree transpiration? *Forests*, 8(9), 350. <https://doi.org/10.3390/f8090350>
- Forster, M. A. (2020). The importance of conduction versus convection in heat pulse sap flow methods. *Tree Physiology*, 40(5), 683-694. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa009>
- Giménez, C., Gallardo, M. y Thompson, R. B. (2013). Plant-water relations. En M. J. Shinderman (ed.), *Reference module in earth systems and environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.05257-X>
- Glass, S. y Zelinka, S. (2010). Moisture relations and physical properties of wood. En R. Ross (ed.), *Wood handbook: Wood as an engineering material* (pp. 4-1-4-19). Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. <https://www.fs.usda.gov/research/treearch/37428>

- González-García, M. A., Paz-González, A. y Castelao-Gegunde, A. (1995). La medida térmica del flujo de savia aplicada al estudio de la extracción de agua por los árboles: revisión bibliográfica y puesta a punto del método. *Forest Systems*, 4(2), 205-220. [https://fs.revistas.csic.es/index.php/fs/article/download/547/544/&ved=2ahUKEwib7NT3tKGGAXWaSzABHcYuC5UQFnoECA4QAusg=AOvVaw1LSJg7Eymd9fmiV\\_7-zzoH](https://fs.revistas.csic.es/index.php/fs/article/download/547/544/&ved=2ahUKEwib7NT3tKGGAXWaSzABHcYuC5UQFnoECA4QAusg=AOvVaw1LSJg7Eymd9fmiV_7-zzoH)
- González-Lozano, L. F. y López-Rozo, J. D. (2021). *Evaluación de la variabilidad genética de la densidad básica y el módulo de elasticidad entre 40 familias de polinización abierta de Gmelina arborea Roxb. en condiciones medioambientales del Alto Magdalena* [Tesis de pregrado]. Universidad del Tolima.
- Granier, A. y Gross, P. (1987). Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. *Annales des Sciences Forestières*, 44(1), 1-14. <https://doi.org/10.1051/forest:19870101>
- Green, S., Clothier, B. y Perie, E. (2009). A re-analysis of heat pulse theory across a wide range of sap flows. *Acta Horticulturae*, 846, 95-104. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.846.8>
- Gutiérrez, J., Pypker, T., Licata, J., Burgess, S. S. O. y Asbjornse, H. (2021). Maximum heat ratio: Bi-directional method for fast and slow sap flow measurements. *Plant and Soil*, 469, 503-523. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05066-w>
- Hakamada, R. E., Hubbard, R. M., Moreira, G. G., Stape, J. L., Campoe, O. y Ferraz, S. F. B. (2020). Influence of stand density on growth and water use efficiency in Eucalyptus clones. *Forest Ecology and Management*, 466, 118125. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118125>
- Hastie, T., Tibshirani, R. y Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction*. (2.ª ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
- Hatton, T. (1990). Integration of sap flow velocity to estimate plant water use. *Tree Physiology*, 6(2), 201-209. <https://doi.org/10.1093/treephys/6.2.201>
- Howell, T. A. (2005). Lysimetry. En D. Hillel (ed.), *Encyclopedia of soils in the environment* (pp. 379-386). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00391-X>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Kunert, N., Schwendenmann, L. y Hölscher, D. (2010). Seasonal dynamics of tree sap flux and water use in nine species in Panamanian forest plantations. *Agriculture and Forest Meteorology*, 150(3), 411-419. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.01.006>

- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J. y Li, W. (2005). *Applied linear statistical models*. (5.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Education. [https://users.stat.ufl.edu/~winner/sta4211/ALSM\\_5Ed\\_Kutner.pdf](https://users.stat.ufl.edu/~winner/sta4211/ALSM_5Ed_Kutner.pdf)
- Looker, N., Martin, J., Jencso, K. y Hu, J. (2016). Contribution of sapwood traits to uncertainty in conifer sap flow as estimated with the heat-ratio method. *Agriculture and Forest Meteorology*, 223, 60-71. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.03.014>
- Lopez-Aguirre, A. M. y Barrios-Trilleras, A. (2023). Variación genética de los rasgos de crecimiento y las características de la madera en razas locales de *Gmelina arborea* Roxb. en el alto Magdalena, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 47(184), 641-653. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1878>
- López-Aguirre, A., Barrios-Trilleras, A. y Melo-Cruz, O. (2024). Balancing wood production and water use efficiency in the selection of open-pollinated families of *Gmelina arborea*. *New Forests*, 55, 961-978. <https://doi.org/10.1007/s11056-023-10013-x>
- Markesteyn, L., Poorter, L., Bongers, F., Paz, H. y Sack, L. (2011). Hydraulics and life history of tropical dry forest tree species: Coordination of species' drought and shade tolerance. *New Phytologist*, 191(2), 480-495. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03708.x>
- Marshall, D. C. (1958). Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*, 33(6), 385-396. <https://doi.org/10.1104/pp.33.6.385>
- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J. y Ribas-Carbó, M. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas*, (43), 63-84. <https://doi.org/10.14198/INGEO2007.43.04>
- Meissner, R., Rupp, H., Seeger, J., Ollesch, G. y Gee, G. W. (2010). A comparison of water flux measurements: Passive wick-samplers versus drainage lysimeters. *European Journal of Soil Science*, 61(4), 609-621. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01255.x>
- Miner, G. L., Ham, J. M. y Kluitenberg, G. J. (2017). A heat-pulse method for measuring sap flow in corn and sunflower using 3D printed sensor bodies and low-cost electronics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 246(4), 86-97. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.06.012>
- Quiñonez-Piñón, M. R. y Valeo, C. (2017). Allometry of sapwood depth in five boreal trees. *Forests*, 8(11), 457. <https://doi.org/10.3390/f8110457>
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. <https://www.gbif.org/tool/81287/r-a-language-and-environment-for-statistical-computing>

- Sebastian, S. (2020). A survey about power consumption for Arduino. *Carpathian Journal of Electrical Engineering*, 14(1), 105-109. <http://cee.cunbm.utcluj.ro/wp-content/uploads/CJEE20209.pdf>
- Steinhart, J. S. y Hart, S. R. (1968). Calibration curves for thermistors. *Deep-Sea Research*, 15(4), 497-503. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(68\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0011-7471(68)90057-0)
- Suárez, J. C., Casanoves, F., Bieng, M. A. N., Melgarejo, L. M., Di Rienzo, J. A. y Armas, C. (2021). Prediction model for sap flow in cacao trees under different radiation intensities in the western Colombian Amazon. *Scientific Reports*, 11, 10512. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89876-z>
- Valverde, J. C., Méndez, D. y Arias, D. (2020). Efectos del defoliador *Atta cephalotes* Linnaeus en el crecimiento y el desarrollo fisiológico e hidráulico de árboles juveniles de *Gmelina arborea* Roxb. en condiciones controladas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(170), 214-226. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1030>
- Vandegehuchte, M. W. y Steppe, K. (2013). Sap-flux density measurement methods: Working principles and applicability. *Functional Plant Biology*, 40(3), 213-223. <https://doi.org/10.1071/FP12233>
- Zeppel, M. J. B., Murray, B. R., Barton, C. y Eamus, D. (2004). Seasonal responses of xylem sap velocity to VPD and solar radiation during drought in a stand of native trees in temperate Australia. *Functional Plant Biology*, 31(5), 461-470. <https://doi.org/10.1071/FP03220>



## CONTENIDO

- Alcance y política editorial de la revista
- Tipos de artículos aceptados
- Formato del artículo
- Envío de artículos
- Procedimiento para la publicación
- Arbitraje de artículos
- Contacto

## ALCANCE Y POLÍTICA EDITORIAL DE LA REVISTA

La revista *Tecnura* es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Francisco José de Caldas, de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

Las áreas temáticas de interés de la revista *Tecnura* están enfocadas a todos los campos de la ingeniería, como la electrónica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecánica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe únicamente a estas, también tienen cabida los temas de educación y salud, siempre y cuando estén relacionados con la ingeniería. La revista publica únicamente artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión y de revisión. En consecuencia, durante la fase de evaluación editorial inicial se rechazarán los artículos cortos y reportes de caso.

La revista *Tecnura* está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de las ingenierías. Tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de las ingenierías, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado. Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés; sin embargo, tendrán preferencia los artículos que muestren conceptos innovadores de gran interés, que traten sobre asuntos relacionados con el objetivo y cobertura temática de la revista.

*Tecnura* es una publicación de carácter académico indexada en los Índices Regionales Scielo Colombia (Colombia) y Redalyc (México), además de las siguientes bases bibliográficas: INSPEC del

Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Académica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), Index Corpernicus (Polonia), Informe Académico de Gale Cengage Learning (México), Periódica de la Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (España) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (España). También hace parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Latindex (México), Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

Tecnura es una revista arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sus directivas, el Editor, el Comité Editorial y Científico no son responsables por la opinión y criterios expresados en el contenido de los artículos y estos se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial.

Además de la versión impresa, la revista Tecnura tiene también una versión digital disponible en su página web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

## TIPOS DE ARTÍCULOS ACEPTADOS

De acuerdo con la clasificación del Índice Nacional de Publicaciones Científicas y Tecnológicas

(Publindex-Colciencias), la revista Tecnura recibe postulaciones de artículos inéditos de los siguientes tipos:

**Artículos de investigación científica y tecnológica:** documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.

**Artículo de revisión:** documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de las investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de al menos 50 referencias.

## FORMATO DEL ARTÍCULO

### Del lenguaje y estilo apropiado para la redacción de artículos

- Deben emplearse estructuras de oraciones simples, evitando las que sean demasiado largas o complejas.
- El vocabulario empleado debe ser básico y común. Los términos técnicos deben explicarse bre-



vemente; asimismo, el significado de las siglas debe presentarse la primera vez que estas aparecen en el texto.

- Los autores son responsables de que su trabajo sea conducido de una manera profesional y ética.

## De la extensión de los documentos

Los artículos no deben tener una extensión de más de 25 páginas en tamaño carta y a doble espacio, con márgenes simétricas de 3 cm. Solo en el caso de los artículos de revisión las 25 páginas no incluyen las referencias bibliográficas.

## Del formato de presentación

Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés y deben digitalizarse en Microsoft Word (2003 en adelante), cumpliendo con las siguientes indicaciones:

Letra *Times New Roman* de 12 puntos (a excepción de que se requiera lo contrario para algunos apartados).

- Una columna a doble espacio.
- Todas las márgenes de 3 cm.
- Los párrafos se justifican, y no debe haber espacio entre los consecutivos.
- No incluir saltos de página o finales de sección.
- Si se desea resaltar palabras o frases del texto, no usar letra negrita sino letra cursiva.
- Los decimales se deben señalar con coma (,) y no con un punto.
- Los millares y millones se deben señalar con un espacio fino.
- Evitar las notas de pie de página.
- Se debe utilizar nomenclatura arábica hasta el tercer nivel únicamente.

## De la estructura del documento

Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

### *Composición de un artículo*

Todos los artículos remitidos para su evaluación y posible publicación por parte de la revista *Tecnura* deben tener por lo menos los siguientes componentes:

- Título en español e inglés.
- Información de los autores.
- Resumen en español e inglés.
- Palabras clave en español e inglés.
- Introducción.
- Conclusiones.
- Trabajo futuro (opcional).
- Agradecimientos (opcional).
- Referencias bibliográficas.

Si el artículo es de investigación científica y tecnológica deben tener, además de lo anterior, los siguientes componentes:

- Metodología.
- Resultados.
- Financiamiento.

## *Título*

El título del artículo deberá ser corto o dividido en título y subtítulo, atractivo para el lector potencial y escrito en mayúscula sostenida. Este debe aparecer centrado entre las márgenes, escrito con letra *Times New Roman*, en negrita, tamaño de fuente 18. El título del artículo debe ir en español e inglés separado por un espacio doble. Máximo 20 palabras.

## *Autores*

Después del título debe escribirse el (los) nombre(s) completo(s) del (los) autor(es), acompañado de los datos biográficos básicos: título de pregrado, título de posgrado, ocupación o cargo, afiliación institucional (institución donde labora), dependencia, ciudad, país y correo electrónico. La información anterior debe ir inmediatamente debajo del nombre del autor.

## *Resumen*

Debe establecer el objetivo y alcance del trabajo, una descripción clara y concisa de la metodología, los resultados y las conclusiones obtenidas. Máximo 250 palabras.

## *Palabras clave*

Debe escogerse entre tres y diez palabras clave, escritas en español con letra *Times New Roman*, en negrita y cursiva.

Las palabras clave deben estar escritas en orden alfabético y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar el tesoro de la UNESCO que se pueden encontrar en la página: <http://databases.unesco.org/thessp>.

## *Abstract*

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del texto que aparece en el resumen en español.

## *Keywords*

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de la lista de palabras clave en español.

Las *keywords* deben estar escritas en el orden de las palabras clave y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar los Tesoros de la IEEE y/o World Bank que se pueden encontrar en las siguientes páginas respectivamente: [http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy\\_v101.pdf](http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf), <http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

## *Introducción*

Debe describir el planteamiento general del trabajo, así como contexto, antecedentes, estado de arte de la temática abordada, objetivo y posible alcance del trabajo.

## *Metodología*

La redacción de este apartado debe permitir a cualquier profesional especializado en el tema replicar la investigación.

## *Resultados*

Explicación e interpretación de los hallazgos. Si es necesario, se puede presentar una discusión breve y enfocada a la interpretación de los resultados.

## *Conclusiones*

Implicación de los resultados y su relación con el objetivo propuesto.

## *Financiamiento*

Mencionar la investigación asociada de la cual se derivó el artículo y la entidad que avaló y financió

dicha investigación.

## *Agradecimientos*

Preferiblemente deben ser breves y deben incluir los aportes esenciales para el desarrollo del trabajo.

## *Ecuaciones*

Deben aparecer centradas con respecto al texto principal. Las ecuaciones deben ser referenciadas con números consecutivos (escritos entre paréntesis cerca al margen derecho). Las ecuaciones se citan en el texto principal empleando la palabra ecuación y seguida del número entre paréntesis. Las ecuaciones deben ser elaboradas en un editor de ecuaciones apropiado y compatible con el paquete de software InDesign, por ejemplo, el editor de ecuaciones de Windows.

## *Tablas*

Para el caso de realización de tablas se recomienda que estas no sean insertadas como imágenes, considerando que en este formato no pueden ser modificadas. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra Tabla (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de un breve nombre de la tabla. El encabezado debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9.

No se presentan cuadros sino tablas y estas se deben levantar automáticamente desde el procesador de textos. Las tablas deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda tabla debe tener en su parte inferior la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

## *Figuras*

Todas las figuras o fotografías deben enviarse en formato PNG o TIFF con una resolución mínima de 300 DPI, adaptadas a escala de grises.

El pie o rótulo de cada figura debe incluir la palabra Figura (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la figura. El pie de figura debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9. Las figuras deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda figura debe tener también la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

## *Símbolos*

Los símbolos de las constantes, variables y funciones en letras latinas o griegas –incluidos en las ecuaciones– deben ir en cursiva; los símbolos matemáticos y los números no van en cursiva. Se deben identificar los símbolos inmediatamente después de la ecuación. Se deben utilizar las unidades,

dimensiones y símbolos del sistema internacional.

Cuando se empleen siglas o abreviaturas, se debe anotar primero la equivalencia completa, seguida de la sigla o abreviatura correspondiente entre paréntesis y en lo subsecuente se escribe solo la sigla o abreviatura respectiva.

## *Referencias bibliográficas*

El estilo de citación de referencias adoptado por la revista *Tecnura* es APA sexta edición. Las citas, referencias bibliográficas e infografía se incluyen al final del artículo. Las referencias bibliográficas deben ordenarse alfabéticamente de acuerdo con el primer apellido del primer autor, sin numeración.

Solo deben aparecer las referencias que fueron citadas en el texto principal del trabajo, en las tablas o en las figuras. Es decir, en la lista no deben aparecer otras referencias aunque hayan sido consultadas por los autores para la preparación del trabajo. Sugerimos utilizar herramientas como: *Citas y bibliografía de Microsoft Word* (para APA sexta edición versión 2013 o superior), *Zotero*, *Mendeley*, entre otras.

El llamado de una referencia bibliográfica se inserta en el texto, en el punto pertinente, bajo ciertas características:

- Si la oración incluye el apellido del autor, solo se debe escribir la fecha dentro de un paréntesis, ejemplo:  
Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en . . .
- Cuando no se incluye el autor en la oración, debe ir entre el paréntesis el apellido y la fecha. La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).
- Si el documento u obra tiene más de dos autores, se debe citar la primera vez con todos los apellidos. 1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008) . . .
- En las menciones siguientes, solo se debe escribir el primer apellido del autor, seguido de un "et al". En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que . . .
- Cuando el documento u obra tiene más de seis autores, se debe utilizar desde la primera mención el "et al".

A continuación se describen una serie de ejemplos de las referencias más utilizadas, según el estilo de referencias adoptado por la revista *Tecnura*:

## **Publicaciones Periódicas:**

### *Forma Básica*

Apellidos, A. A., Apellidos, B. B. & Apellidos, C. C. (Fecha). Título del artículo. Título de la publicación, volumen (número), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

## *Artículo básico*

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12-23. doi: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01>

## *Artículo web*

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHZ. *Revista Tecnura*, 18(42), 38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

## **Libros:**

### *Forma Básica*

Apellidos, A. A. (Año). Título. Ciudad: Editorial.

Apellidos, A. A. (Año). Título. Recuperado de <http://www.xxxxxx.xxx>

Apellidos, A. A. (Año). Título. doi: xx.xxxxxxxx

Apellidos, A. A. (Ed.). (Año). Título. Ciudad: Editorial.

### *Libro con autor*

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

### *Libro con editor*

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

### *Libro versión electrónica:*

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/978-0-387-85784-8

## **Informe técnico**

### *Forma Básica*

Apellidos, A. A. (Año). Título. (Informe Núm. xxx). Ciudad: Editorial

### *Informe con autores*

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). U. S. Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute

of Tropical Forestry.

## *Informe de una agencia del gobierno*

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

## **Tesis**

### *Forma Básica*

Apellidos, A. A. (Año). Título. (Tesis inédita de maestría o doctorado). Nombre de la institución, Localización.

### *Tesis inédita, impresa*

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

### *Tesis de base de datos comercial*

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

### *Tesis web*

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de [http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis\\_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf](http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf)

## **Estándares o patentes**

### *Forma Básica*

Apellidos, A. A. Título de la patente. País y número de la patente. Clasificación de la patente, fecha de concesión oficial. Número y fecha de solicitud de la patente, paginación.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

## **ENVÍO DE ARTÍCULOS**

Los autores deben enviar sus artículos a través de la aplicación para tal fin del Open Journal System

en formato digital, adjuntando la carta de presentación y el formato de información artículo-autores.

## Carta de presentación

El artículo debe ir acompañado de una carta de presentación dirigida al director y editor de la revista, Ing. Cesar Augusto García Ubaque, donde incluya:

- Solicitud expresa de considerar su artículo para publicarlo en la revista Tecnura.
- Título completo del trabajo.
- Nombres completos de todos los autores del trabajo.
- Certificación de la originalidad y el carácter inédito del trabajo.
- Exclusividad de su remisión a la revista Tecnura.
- Confirmación de la autoría con la firma de todos los autores.

Esta carta deberá estar firmada por todos los autores, escanearse y enviarse junto con los demás documentos solicitados.

## Formato de información artículo-autores

El artículo además debe ir acompañado de un formato de información sobre el artículo y sus autores, el cual se puede descargar de la página web de la revista Tecnura: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>, en la sección “Formatos y Documentos”. Es importante completar todos los campos de información solicitados, algunos de ellos tienen comentarios para aclarar mejor lo que se está solicitando. El formato no debe escanearse.

## Artículo

Artículo en formato digital (Word 2003 en adelante) que cumpla con todas las normas de presentación descritas en el capítulo 3, “Formato del artículo”, de la presente en las instrucciones a los autores.

## PROCEDIMIENTO PARA LA PUBLICACIÓN

El procedimiento que sigue la revista Tecnura para la evaluación y posible publicación de los trabajos enviados por los autores es el siguiente en orden cronológico:

1. Envío del artículo acompañado de la carta de presentación y el formato de información por parte de los autores.
2. Notificación al autor de correspondencia de la recepción del artículo.
3. Verificación del tema del artículo con respecto a las áreas de interés de la revista.



4. Verificación de las normas de presentación por parte del monitor de la revista.
5. Notificación al autor de correspondencia de la evaluación de las normas de presentación.
6. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a la evaluación de las normas de presentación
7. Envío del artículo a los árbitros seleccionados.
8. Notificación del inicio del proceso de arbitraje del artículo.
9. Notificación a los autores de la decisión tomada por el Comité Editorial y de las evaluaciones hechas por los árbitros.
10. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a las evaluaciones de los árbitros.
11. Estudio de la versión final del artículo y de las evaluaciones de los árbitros por parte del Comité Editorial.
12. Envío por parte de los autores de la carta de cesión de derechos al editor de la revista.
13. Envío de la versión con corrección de estilo y diagramada a los autores.
14. Verificación de errores y aprobación final de la versión con corrección de estilo y diagramada por parte de los autores.
15. Publicación del artículo en el número correspondiente de la revista Tecnura.
16. Notificación a los autores de la publicación del número de interés.
17. Envío de un ejemplar de la revista a cada autor del artículo publicado.

### PROCESO DE ARBITRAJE DE ARTÍCULOS

Considerando la periodicidad trimestral de la revista, el Comité Editorial realiza cuatro convocatorias anuales para la recepción de artículos, aproximadamente en los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre. Los artículos serán recibidos hasta la fecha máxima establecida en cada convocatoria.

Una vez recibidos los artículos el monitor de la revista realizará una primera evaluación de forma para verificar que cumplan con todos los elementos mencionados en esta guía de instrucciones a los autores. Luego de recibir nuevamente el artículo con las correcciones de forma solicitadas por el monitor de la revista, este será sometido a evaluación por tres pares académicos (paulatinamente se espera incorporar un mayor número de pares externos que participen en el proceso).

Cada artículo remitido a la revista Tecnura es revisado por dos pares académicos externos a la institución de los autores, mediante un proceso de “revisión entre pares” (*Peer-review*) de doble-ciego, garantizando el anonimato de los autores y evaluadores; se considera confidencial todo trabajo recibido y así se le exige a sus evaluadores.

Las posibles conclusiones de los resultados de la evaluación por parte de los árbitros son únicamente tres: publicar el artículo sin modificaciones, publicar el artículo con modificaciones o no publicar el artículo.

Posteriormente, el Comité Editorial toma la decisión de publicar o no los artículos, con base en los resultados de las evaluaciones realizadas por los árbitros asignados. En caso de existir contradicciones en las evaluaciones con respecto a la publicación de un artículo, el Comité Editorial enviará el artículo a un tercer árbitro y se inclinará por las dos evaluaciones que tengan el mismo concepto respecto a la publicación del artículo.

En cada convocatoria el autor de correspondencia debe sugerir al menos cuatro posibles evaluadores externos a su institución laboral, los cuales deben ser especialistas en el tema específico del artículo remitido, tener al menos maestría y por lo menos dos deben ser internacionales. Los posibles evaluadores pueden pertenecer a una universidad o industria, pública o privada; de estos se debe proporcionar el nombre completo, su formación académica más alta, su afiliación institucional y su correo electrónico. Estos cuatro potenciales evaluadores serán analizados por el Comité Editorial a fin de ampliar la base de datos de los árbitros de la revista Tecnura.

El Comité Editorial de la revista Tecnura se reserva los derechos de impresión, reproducción total o parcial del artículo, así como el de aceptarlo o rechazarlo. Igualmente, se reserva el derecho de hacer cualquier modificación editorial que estime conveniente; en tal caso el autor recibirá por escrito recomendaciones de los evaluadores. Si las acepta, deberá entregar el artículo con los ajustes sugeridos dentro de las fechas fijadas por la revista para garantizar su publicación dentro del número programado.

### CONTACTO

Para cualquier solicitud de información adicional puede comunicarse a través del correo electrónico de la revista Tecnura: [tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com), o por mensajería con el Ing. Cesar Augusto García Ubaque, Director y Editor de la revista Tecnura, a la dirección:

Revista Tecnura  
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.  
Facultad Tecnológica  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur  
Teléfono: 571 – 3239300 Extensión: 5003



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

## Instrucciones para los autores

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/about/submissions>

---

Celular: 57-3153614852

Bogotá D.C., Colombia

Email:

[tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co](mailto:tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)

Página web:

<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

## CONTENT

- Scope and editorial policy of the journal
- Type of accepted articles
- Article format
- Article submission
- Publication procedure
- Article arbitration
- Contact

Tecnura journal is an institutional publication of the Faculty of Technology from University Francisco José de Caldas. It is a scientific and technological publication with quarterly periodicity, which is published in January, April, July and October. The first issue appeared in the second semester of 1997 and up to now it has maintained its regularity.

The areas of interest of Tecnura journal are focused on all engineering fields such as electronics, telecommunications, electricity, systems, industrial, mechanics, cadastral, civil, environmental, among others. However, it is not restricted to those; it also has room for education and health issues, as long as they are related to engineering. The journal will only publish concerning scientific and technological research, reflection and revision. In consequence, during the initial editorial evaluation, short articles and case reports will be rejected.

Tecnura Journal is addressed for professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and follow-up of scientific-technologic processes in the field of engineering. Tecnura Journal has as mission to disseminate results of research projects in the areas of engineering, through the publication of original and unpublished articles, conducted by academics and professionals accredited by public or private national or foreign institutions. Articles submitted to Tecnura journal must be unpublished works written in Spanish or English; nevertheless, preference will be given to articles that show innovative concepts of great interest, related to the objective and scope of the journal.

Tecnura is an academic publication indexed in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); as well as of the following bibliographic databases: INSPEC of the Institution of Engineering and Technology (England), Fuente Académica Premier of EBSCO (United States), CABI (England), Index Copernicus (Poland), Informe Académico of Gale Cengage Learning (México), Periódica from the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet from the Universidad de la Rioja (Spain). It is also part of the following directories: Online

Regional Information System for Scientific journals from Latin America, Caribbean, Spain and Portugal Latindex (México), Bibliographic Index Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Spain), DOAJ (Sweden) and Ulrich of Proquest (United States).

Tecnura is a journal arbitrated by a revision process among double blind peers. The schedule of the conformation of its scientific and editorial committee is subject to the publication of articles in internationally indexed journals by their members.

District University Francisco José de Caldas, its directors, the editor, the editorial and scientific committee are not responsible for the opinions and the criteria expressed in the content of the articles and they are published under the exclusive responsibility of the authors and do not necessarily reflect the ideas of the editorial committee.

In addition to the printed version, Tecnura journal also has a digital version available in its web page: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>

## TYPE OF ARTICLES ACCEPTED

According to the classification of the Scientific and Technological Publications National Index (Publindex-Colciencias), Tecnura journal receives nominations of unpublished articles on the following topics:

- **Scientific and technological research articles:** document that presents, in a detailed manner, the original results of research projects. The generally used structure contains four main parts: introduction, methodology, results and conclusions.
- **Reflection articles:** document that presents research results from an analytic, interpretative or critic perspective from the author, dealing with a specific topic and adopting original sources.
- **Review article:** document that results from a research where the results of published or unpublished research on a science or technology field are analyzed, systematized and integrated, in order to state the advances and tendencies in development. It is characterized for presenting a careful bibliographical review of at least 50 references.

## ARTICLE FORMAT

### About the appropriate language and style for articles writing

- Authors must use simple sentence structures, avoiding those too long or complex.
- The vocabulary used must be basic and common. Technical language must be briefly explained; also, the meaning of the acronyms must be given the first time they appear in the text.
- The authors are responsible for their work to be conducted in a professional and ethic manner.

---

## About the length of articles

The articles should not exceed 25 pages in letter size and double space, with symmetric margins of 3 cm. Only in the case of review articles, these 25 pages do not include references.

## About the presentation format

Submitted articles must be unpublished works written in Spanish or English, and must be typed in Microsoft Word (2003 and beyond), complying with the following indications:

- *Times New Roman* letter, 12 point (except it is required for some sections).
- One column, double-spaced.
- All the margins 3 cm.
- Paragraphs should be justified without spaces between consecutives and without cutting words.
- Do not include page breaks or section finals.
- If you want to emphasize words or phrases from the text, do not use bold letters but italic.
- Decimals should be pointed with comma (,) and not with period (.).
- Thousands and millions should be pointed with a fine space.
- Avoid footnotes.
- Arabic nomenclature must be used only until the third level.

## About the article structure

The papers must have the following structure and comply with the following requirements:

## Composition of an article

All the articles submitted for evaluation and possible publication by the Tecnura Journal must have at least the following components:

- Title in Spanish and English.
- Information about the authors.
- Abstract in Spanish and English.
- Key words in Spanish and English.
- Introduction.
- Conclusions.

- Future work (optional).
- Acknowledgements (optional).
- Bibliographical references.

If the article is related to scientific and technological research must have, in addition to the above, the following components:

- Methodology.
- Results.
- Financing.

### *Title*

The title of the article must be short or divided in title and subtitle, attractive for the potential reader and written in capital letters. It should appear centered between the margins, written in *Times New Roman* letter, in bold, font size 18. The title of the article has to be in Spanish and English separated by double space. Maximum 20 words.

### *Authors*

After the title the complete name(s) of the author(s) must be written, with their basic biographical data: undergraduate degree, graduate degree, occupation or position, institutional affiliation (institution where they work), dependency, city, country and e-mail. The above information must be immediately below the author's name.

### *Abstract*

The scope and purpose of the work must be established giving a clear and concise description of the methodology, results presented and the conclusions obtained. Maximum of 250 words.

### *Keywords*

Between three and ten keywords must be chosen, written in English with *Times New Roman* letter in bold and italic.

Key words must be written in alphabetic order and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the IEEE thesaurus and World Bank thesaurus that can be accessed at the following web pages respectively:

[http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy\\_v101.pdf](http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf)

---

<http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

### *Abstract in Spanish*

Translation to the Spanish language of the text that appears in the abstract, it must be correct and precise.

### *Keywords in Spanish*

Translation to the English language of the keywords in Spanish, they must be correct and precise.

Keywords must be written in the order of the English version and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the UNESCO thesaurus that can be found at the following web pages:

<http://databases.unesco.org/thessp>

### *Introduction*

The general idea of the work must be described, its context, backgrounds, state of the art of the topic, objectives and possible scope of the work.

### *Methodology*

The writing of this part must allow any specialized professional in the topic to replicate the research.

### *Results*

Explanation and interpretation of the findings. If necessary, a brief discussion focused on the interpretation of the results can be presented.

### *Conclusions*

Implication of the results and their relation to the proposed objective.

### *Financing*

Mention the associated research from which the article was derived and the entity that endorsed and financed the research.

### *Acknowledgments*

They should preferably be brief and include the essential contributions for the development of the paper.



### *Equations*

Equations must appear centered with respect to the main text. They must be referenced with consecutive numbers (written in parenthesis close to the right margin). Equations are cited in the main text employing the word equation, and followed by the number in parenthesis. Equations must be made in an appropriate equation editor and compatible with "InDesign" software, as for example the equation editor of Windows.

### *Tables*

In the case of implementation of tables, it is recommended that these are not inserted as images, considering that in that format they cannot be modified. The title of each table must include the word table (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief name of the table. The heading must be written in TNR letter, italic and font size 9.

Charts are not presented but tables and they should be automatically raised from the text processor. Tables should be named and referenced in the article, in strict order. Every table must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

### *Figures*

All the figures or pictures have to be sent in JPG or PNG format with a minimum resolution of 300 DPI, adapted to gray scale.

The footnote or name of each figure must include the word figure (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief description of the content of the figure. The footnote of the figure must be written in Times New Roman letter, italic and font size 9. Figures must be named and referenced in the article, in strict order. Every figure must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

### *Symbols*

The symbols of the constants, variables and functions in Latin or Greek letters –included in the equations– must be in italic; the mathematical symbols and the numbers do not go in italic. The symbols must be identified immediately after the equation. Units, dimensions and symbols of the international system must be used.

When using acronyms or abbreviations, the complete equivalence should be written first, followed by the corresponding acronym or abbreviation in parenthesis and from there it is only written the respective acronym or abbreviation.

### *Bibliographic references*

The adopted reference citation style by Tecnura journal is APA sixth edition. The cites, bibliographic references and infography are included in the last part of the article. The bibliographic references must be alphabetically ordered according to the author's first surname, without numbering.

There should only appear the cited references in the main body of the work, in tables or in figures. It means, in the list there should not appear other references although they have been consulted by the authors for the work preparation. We suggest using tools such as: Cites and bibliography from Microsoft Word (for APA sixth edition version 2013 or superior), Zotero, Mendeley, among others.

The call for a bibliographic reference is inserted in the text, at the pertinent point, under certain characteristics:

- If the sentence includes the author's surname, it should only be written the date into a parenthesis, for instance:  
Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en ....
- When the author is not included in the sentence, surname and date must be into a parenthesis.  
La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).
- If the document or work has more than two authors, the first cite must include all the surnames.  
1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008) ....
- In the following mentions, it must only be written the author's first surname, followed by "et al.". En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que ...
- When the document or work has more than six authors, it must be used from the first mention "et al.".

Next it is described a series of examples of the more used references, according to the reference style adopted by Tecnura journal:

### Periodical Publications:

#### *Basic Form*

Surnames, A. A., Surnames, B. B. & Surnames, C. C. (Date). Article's title. Title of the publication, volume (number), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

#### *Basic article*

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. Revista Tecnura, 18(42), 12-23. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01>

#### *Web article*

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHZ. Revista Tecnura, 18(42), 38-52. Recuperado de <http://revistas.>

## Books:

### *Basic Form*

Surnames, A. A. (Year). Title. City: Editorial.

Surnames, A. A. (Year). Title. Recovered from <http://www.xxxxxx.xxx>

Surnames, A. A. (Year). Title. doi: xx.xxxxxxxx

Surnames, A. A. (Ed.). (Year). Title. City: Editorial.

### *Book with author*

Goleman, D. (2000). La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual. México: Ediciones B.

### *Book with editor:*

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas.

### *Book electronic version:*

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). Psychology of Liberation: Theory and applications. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/ 978-0-387-85784-8

## Technical report:

### *Basic Form*

Surnames, A. A. (Year). Title. (Report No. xxx). City: Editorial

### *Report with authors*

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). U. S. Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

### *Report from a Government agency*

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

## Thesis

### *Basic form*

Surnames, A. A. (Year). Title. (Unpublished master or doctorate thesis). Institution name, Location.

### *Unpublished thesis, printed*

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

### *Commercial database thesis*

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

### *Web thesis*

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de [http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis\\_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf](http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf)

## Standards or patents

### *Basic form*

Surnames, A. A. Title of the patent. Country and number of the patente. Classification of the patent, date of official license. Number and date of patent request, pagination.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

## ARTICLE SUBMISSION

Authors must submit their articles through the application Open Journal System in digital format, attaching the cover letter and the article-authors format.

### Cover letter

The article must be submitted with a cover letter addressed to the director and editor of the journal, Engineer Cesar Augusto Garcia Ubaque, including:

- Specific request to consider your article to be published in Tecnura journal.
- Full title of the article.
- Full names of all the authors of the paper.

- Certification of the originality and unpublished character of the paper.
- Exclusivity of submission to Tecnura journal.
- Authoring confirmation with signature of all the authors.

This letter must be signed by all the authors, scanned and sent with the remaining requested documents.

### Article-authors information format

The article has to be submitted with an information format about the article and its authors which can be downloaded from the web page of Tecnura journal <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>, in the section "Forms and Documents". It is important to complete all the fields of information requested, some of them have comments to clarify better what is being requested. The format must not be scanned.

### Article

Article in digital format (Word 2003 and later editions) that complies with all the presentation rules described in chapter three, "Article structure", of this guide of instructions for authors.

### PUBLICATION PROCEDURE

The procedure to be followed by Tecnura journal for the evaluation and possible publication of the papers sent by the authors is the following in chronological order:

1. Delivery of the article with the cover letter and the information format by the authors.
2. Notification to the author about the reception of the article.
3. Verification of the presentation rules by the monitor of the journal.
4. Notification to the author about the evaluation of the presentation rules.
5. Submission of corrections made by the authors related to the evaluation of presentation rules.
6. Submission of the articles to the selected arbitrators.
7. Notification of the beginning of the arbitration process of the article.
8. Notification to the authors about the decision made by the editorial committee, and about the evaluations made by the arbitrators.
9. Delivery of the corrections made by the authors with respect to the evaluations made by the arbitrators.

10. Study of the final version of the article and the evaluations of the arbitrators by the editorial committee.
11. Delivery by the authors of the letter that surrenders right to the editor of the journal.
12. Submission of the version with style corrections and diagrammed to the authors.
13. Verification of errors and final approval of the version with style corrections and diagrammed by the authors.
14. Publication of the article in the corresponding number of Tecnura journal.
15. Notification to the authors of the number of interest.
16. Delivery of a copy of the journal to each one of the authors of the published article.

### ARTICLE ARBITRATION PROCESS

Considering the quarterly periodicity of the journal, the Editorial Committee makes four calls every year for the submission of articles, approximately in the months of February, May, August and November. The articles will be received until the date established in the call.

Once received the articles, the monitor of the journal will make an initial form evaluation to verify the completion of the elements mentioned in this guide of instructions to authors. After receiving again the article with the requested corrections by the journal's monitor, the paper will be submitted to evaluation by three academic peers (through time it is expected to include more external peers to participate in the process).

Each article sent to Tecnura journal is checked by two expert academic peers external to the institution of the authors, by a process of "Peer-review" of double blind, guaranteeing the anonymity of authors and evaluators; every paper sent is considered confidential and so it is demanded to evaluators.

Possible conclusions of the result of the evaluation by the judges are only three: publish the article without modifications, publish the article with modifications and not publish the article.

Subsequently, the Editorial Committee takes the decision to publish or not the articles, based on the results of the evaluations made by the assigned arbitrators. In case of contradictions in the evaluations with respect to the publication of an article, the editorial committee will send the article to a third peer and will be inclined for the two evaluations that have the same concept with respect to the publication of the article.

In each call the main author must suggest at least four possible external arbitrators to his work institution evaluators, who must be specialists in the specific topic of the article sent and must have at least Masters level, and at least two must to be international. Potential evaluators can belong to

a university or industry, public or private; their complete names must be provided, highest academic formation, institutional affiliation and e-mail. The editorial committee will analyze these four potential evaluators in order to enrich the database of arbitrators of Tecnura journal.

The Editorial Committee of Tecnura journal reserves the right to print, reproduce total or partially the article, as the right to accept or reject it. In the same way, it has the right to make any editorial modification that considers necessary; in this case the author will receive written recommendations from the evaluators. If accepted, authors must deliver the article with the suggested adjustments within the dates given by the journal to guarantee its publication in the programmed number.

### CONTACT

For any additional information request, please send an e-mail to Tecnura journal [tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com) or by mail to Cesar Augusto Garcia Ubaque, Director and Publisher of Tecnura Journal, to the following address:

Tecnura Journal  
Journals Room, Block 5, Office 305.  
Faculty of Technology  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur  
Phone: 571-3239300 Extension: 5003  
Mobile: 57-3153614852  
Bogotá D.C., Colombia  
Email:  
[tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co](mailto:tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)  
Web page:  
<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>