
12 Editorial

Investigación

- 18 Magnetic Barkhausen Noise Measurements on Rocks
Miriam Rocío Neyra Astudillo, María Isabel López-Pumarega, Silvana Evangelina-Geuna, Martín Gómez
- 30 Modelos computacionales en la posturografía
Lely Adriana Luengas, Luis Felipe Wanumen Silva
- 49 Multitemporal Analysis of Urban Expansion in the Municipality of Madrid, Cundinamarca, between 1977 and 2020
César Augusto García, María Fernanda Culma Tamara
- 67 Metodología para identificar zonas y estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayos en Barrancabermeja-Yondó
Brandon Steven Ardila Murillo, Edison Andrés Soto Ríos
- 86 Low-cost Prototype Pyrgeometer for Atmospheric Radiation Measurements
César Alexander Chacón Cardona, Yuber Otálora Porras, Cristian Camilo Serrano Franco
- 98 Medición de parámetros en líneas de transmisión con sistemas embebidos
Jorge Enrique Herrera-Rubio, Angelo Joseph Soto-Vergel, Darwin Orlando Cardozo-Sarmiento
- 115 Optimal Synthesis of a Four-Bar Mechanism for the Knee Using Natural Coordinates for Kinematic Formulation
Elkin Flórez, Neider Nadid Romero Nuñez, Yezid Alberto Florez Martínez
-

Reflexión

- 130 Uso de robótica en una emergencia sanitaria
Yeyson Becerra, Mario Ricardo Arbulu Saavedra
-

Revisión

- 142 Métodos cuantitativos de evaluación del espacio público: aporte al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible
Tania Giraldo Ospina, Jorge Galindo-Díaz, Luis Vásquez-Varela
-

162 Instructions for authors

175 Instrucciones para autores

Vol. 26 Núm. 73 • Julio - Septiembre de 2022 • Bogotá, Colombia • Publicación trimestral - ISSN: 0123-921X • e-ISSN-e 2248-7638

Tecnura

V.26
N.73



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica

Revista Tecnura • Volumen 26 – Número 73 • Julio - septiembre de 2022
ISSN (impreso): 0123-921X • e-ISSN: 2248-7638 • Bogotá D.C. Colombia



Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Volumen 26 - Número 73
Julio - Septiembre de 2022

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

EDITOR

Ph.D. Ing. César Augusto García Ubaque
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

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

COMITÉ EDITORIAL

Ph.D. Ing. César Augusto García Ubaque
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Ing. Steven M. LaValle
University of Illinois, Estados Unidos

Ph.D. Ing. César Augusto Hernández Suárez
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

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

Ph.D. Ing. Edgar Francisco Vargas
Universidad de Los Andes, Colombia

EVALUADORES

Ph.D. Ing. Diego Fernando del Rio Trujillo
Universidad Nacional de Colombia

Ph.D. Ing. Ingrid Patricia Páez Parra
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Fredy Hernan Martinez Sarmiento
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Ing. Johan José Sánchez Mora
Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Ph.D. Ing. Marcos Rubinstein
Instituto Federal Suizo de Tecnología, Lausanne, Suiza

Ph.D. Ing. José Antonio Velásquez Costa
Universidad Ricardo Palma, Perú

Ph.D. Rosa Piotrkowski
Universidad Nacional de Buenos Aires, Argentina

Ph.D. Ing. Mario Ricardo Arbulu Saavedra
Universidad de La Sabana, Colombia

Ph.D. Ing. Yolanda Torres
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Ph.D. Diego Luis González
Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia

M Ing. Fernando Martinez Santa
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Julyan Cartwright
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España

M. Jaime Hernández-García
Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

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

M. Ing. James Ronald Vera Rozo
Universidad de Guanajuato, Mexico

COMITÉ CIENTÍFICO

Ph.D. Ing. Alfonso Prieto Guerrero
Universidad Autónoma Metropolitana, México

M. Ing. Jesus Alvarez Guerrero
Universidad Libre, Colombia

Ph.D. Ing. Enrique Rodríguez de la Colina
Universidad Autónoma Metropolitana, México

M. Maira Cecilia Gasca Mantilla
Universidad Antonio Nariño, Colombia

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

M. Ing. María Fernanda Díaz Hernández
Universidad El Bosque, Colombia

Ph.D. Ing. Jorge Mario Gómez
Universidad de Los Andes, Colombia

M. María José Freire
Universidad Central de Ecuador, Ecuador

Ph.D. Ing. Juan Antonio Conesa
Universidad de Alicante, España

M. Stella Maren Schroeder
Universidad de Piura, Peru

M. Sergio Basilio Sepulveda Mora
University of Delaware, Estados Unidos

ASISTENTES DE LA REVISTA

Lizeth Viviana Urrea

COORDINACIÓN EDITORIAL

Fernando Piraquive
Centro de investigaciones y desarrollo tecnológico-CIDC
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Tecnura

Julio - Septiembre de 2022

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 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 Ing. Cesar Augusto García Ubaque
Ph.D. Director y Editor Revista Tecnura
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70B No. 73A-35 sur
Teléfono: 571-3239300
Celular: 57-3153614852
Bogotá, D.C., Colombia
Correo electrónico:
tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co
Tecnura en internet:
<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA ESPAÑOL

Fernando Carretero Padilla

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLÉS

Laura Ximena García

DISEÑO DE CUBIERTA

Andrés Enciso

DIAGRAMACIÓN Y DISEÑO L^AT_EX*

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. Ing. César Augusto García Ubaque
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

EDITORIAL COMMITTEE

Ph.D. Ing. César Augusto García Ubaque
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Ing. César Augusto Hernández Suárez
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Ing. Edgar Francisco Vargas
Universidad de Los Andes, Colombia

Ph.D. Ing. Ingrid Patricia Páez Parra
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Ing. Johan José Sánchez Mora
Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Ph.D. Ing. José Antonio Velásquez Costa
Universidad Ricardo Palma, Perú

Ph.D. Ing. Mario Ricardo Arbulu Saavedra
Universidad de La Sabana, Colombia

Ph.D. Diego Luis González
Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia

Ph.D. Julyan Cartwright
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España

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

SCIENTIFIC COMMITTEE

Ph.D. Ing. Alfonso Prieto Guerrero
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Enrique Rodríguez de la Colina
Universidad Autónoma Metropolitana, México

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

Ph.D. Ing. Jorge Mario Gómez
Universidad de Los Andes, Colombia

Ph.D. Ing. Juan Antonio Conesa
Universidad de Alicante, España

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

Ph.D. Ing. Steven M. LaValle
University of Illinois, Estados Unidos

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

EVALUATORS

Ph.D. Ing. Diego Fernando del Rio Trujillo
Universidad Nacional de Colombia

Ph.D. Fredy Hernan Martinez Sarmiento
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Ing. Marcos Rubinstein
Instituto Federal Suizo de Tecnología, Lausanne, Suiza

Ph.D. Rosa Piotrkowski
Universidad Nacional de Buenos Aires, Argentina

Ph.D. Ing. Yolanda Torres
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

M Ing. Fernando Martinez Santa
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

M. Jaime Hernández-García
Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

M. Ing. James Ronald Vera Rozo
Universidad de Guanajuato, Mexico

M. Ing. Jesus Alvarez Guerrero
Universidad Libre, Colombia

M. Maira Cecilia Gasca Mantilla
Universidad Antonio Nariño, Colombia

M. Ing. María Fernanda Díaz Hernández
Universidad El Bosque, Colombia

M. María José Freire
Universidad Central de Ecuador, Ecuador

M. Stella Maren Schroeder
Universidad de Piura, Peru

M. Sergio Basilio Sepulveda Mora
University of Delaware, Estados Unidos

TECNURA JOURNAL ASSISTANTS

Lizeth Viviana Urrea

EDITORIAL COORDINATION

Fernando Piraquive
Centro de investigaciones y desarrollo tecnológico-CIDC
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Tecnura

Julio - Septiembre de 2022

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

Send to Engr. Cesar Augusto García Ubaque, Ph.D.

Director and Editor Revista Tecnura

Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305

Faculty of Technology

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Transversal 70B No. 73A - 35 sur

Telephone Number: 571 - 3239300

Cell phone Number: 57 - 3153614852

Bogotá D.C., Colombia

E-mail:

tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co

Tecnura on internet:

<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

STYLE CORRECTION IN SPANISH

Fernando Carretero Padilla

STYLE CORRECTION IN ENGLISH

Laura Ximena García

TITLE PAGE DISEGN

Andrés Enciso

LAYOUT AND L^AT_EX* 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.

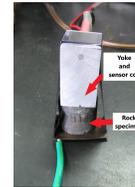


Editorial 12

Magnetic Barkhausen Noise Measurements on Rocks 18

Mediciones del Ruido Magnético Barkhausen en rocas

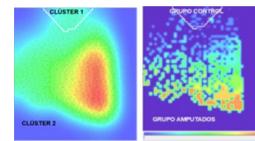
Neyra Astudillo., M.R. López Pumarega., M.I. Geuna., S.E. y Gómez., M.P.



Computational models in posturography 30

Modelos computacionales en la posturografía

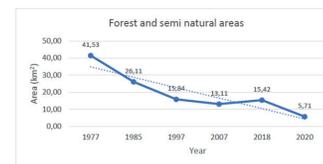
Luengas-Contreras., L.A. y Wanumen-Silva., L.F.



Multitemporal Analysis of Urban Expansion in the Municipality of Madrid, Cundinamarca, between 1977 and 2020 49

Análisis multitemporal de la expansión urbana en el municipio de Madrid, Cundinamarca, entre 1977 y 2020

Culma-Tamara., M.F y García-Ubaque., C.A.



Methodology to identify areas and elevated structures with the greatest amount of lightning impacts in Barrancabermeja-Yondó 67

Metodología para identificar zonas y estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayos en Barrancabermeja-Yondó

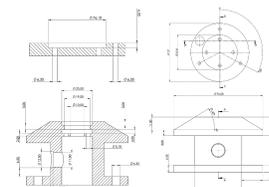
Ardila-Murillo., B.E. y Soto-Ríos., E.A.



Low-cost Prototype Pyrgeometer for Atmospheric Radiation Measurements 86

Prototipo de pirgeómetro de bajo costo para mediciones de radiación atmosférica

Otálora-Porras., Y. Serrano-Franco., C.C y Chacón-Cardona., C.A.





Measuring parameters in transmission lines with embedded systems 98

Medición de parámetros en líneas de transmisión con sistemas embebidos

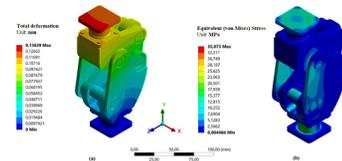
Soto-Vergel, A.J. Herrera-Rubio, J.E. y Cardozo-Sarmiento, D.O.



Optimal Synthesis of a Four-Bar Mechanism for the Knee Using Natural Coordinates for Kinematic Formulation 115

Síntesis óptima de un mecanismo de cuatro barras para la rodilla utilizando coordenadas naturales para la formulación cinemática

Flórez-Serrano, E.G Romero-Núñez, N.N y Flórez-Martínez, Y.A.



Employing Robotics in a Health Emergency 130

Uso de robótica en una emergencia sanitaria

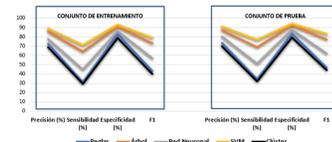
Becerra-Mora, Y.A. y Arbulu-Saavedra, M.R.



Quantitative methods of public space evaluation: Contribution to the fulfillment of the SDGs 142

Métodos cuantitativos de evaluación del espacio público: aporte al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Giraldo-Ospina, T. Galindo-Díaz, J y Vásquez-Varela, L.R.



Instrucciones para los autores 162

Instructions for authors 175

El mundo actual presenta desafíos para todo tipo de actividades y de saberes. Las tecnologías y las técnicas que se han desarrollado y que dan un impulso sin precedentes al desarrollo de la especie humana, también han impuesto un gran número de retos, entre ellos, cambiar el modo de vida del grueso de la población a nivel mundial, en un sinnúmero de aspectos, en pro de garantizar un desarrollo responsable y digno.

En 1972 con la cumbre de Estocolmo de las Naciones Unidas, se puso de manifiesto por primera vez la preocupación acerca de los efectos del actuar del hombre sobre su medio ambiente; y de las responsabilidades que tiene el ser humano como constructor de su propio entorno. En 1987 con el documento “Nuestro Futuro Común” producto de la primera reunión de la “Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo” se definió el concepto de desarrollo sostenible como: *“la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”*¹. En 1992 con la cumbre de la tierra en Rio de Janeiro, se promulgó “La Declaración de Rio sobre Medio Ambiente y desarrollo”, en la que, entre otros aspectos, se describe la importancia del intercambio tecnológico y la investigación, la necesidad de superar la pobreza como requisito fundamental del desarrollo sostenible, y la importancia de la protección del medio ambiente en cada aspecto del desarrollo de un país.

Los rasgos de responsabilidad ambiental implícitos en el desarrollo sostenible, pueden pasar desapercibidos en espectros importantes del desarrollo como lo la economía y las realidades sociales. Con la cumbre de Johannesburgo de las Naciones Unidas en el 2002 se hizo visible el espectro social del desarrollo sostenible, *“En esta cumbre se reconoció que la base para alcanzar el desarrollo sostenible pasaba por solventar el problema de la pobreza y aminorar la brecha que separa ricos y pobres”*², del mismo modo y en concordancia con la evolución del concepto, se establecieron como pilares del desarrollo sostenible el desarrollo económico, la conservación del medio ambiente y la equidad social.

La Ingeniería Civil como disciplina generadora de conocimientos y soluciones en diversos campos de interés del hombre como la vivienda, el saneamiento básico, la gestión de riesgos y el territorio, tiene gran incidencia en el desarrollo y en el impacto en diversos sectores del medio ambiente humano, no solo tiene un impacto directo en la parte ecológica del mismo, también puede afectar sectores como la economía, la política, incluso la estructura social de una nación.

Según la Organización Internacional del Trabajo en el informe “La industria de la construcción en el siglo XXI: su imagen, perspectivas de empleo y necesidades en materia de calificaciones”, la industria de la construcción constituye en países en vía de desarrollo un sector importante que brinda

¹NACIONES UNIDAS. Desarrollo sostenible: antecedentes [en línea]: Colombia. [fecha de consulta: 20 de agosto de 2015]. Disponible en: <http://www.un.org/es/ga/president/65/issues/sustdev.shtml>

²ÁNGEL VEGA, José Luis. Responsabilidad social y los principios del desarrollo sostenible como fundamentos teóricos de la información social de la empresa. ESIC. España. 2009. Página 105, Evolución del concepto de desarrollo sostenible.

y genera empleo y oportunidades laborales para una gran parte de la población vulnerable de estos países en tanto que *“tiene la capacidad de absorber a los excluidos, proporciona empleo a los que tienen pocos estudios o calificaciones, muchos de ellos procedentes de las capas más pobres de la sociedad”*³, así mismo, en países desarrollados tiene un crecimiento dinámico y constituye un porcentaje importante de la inversión lo que lo convierte en un sector importante de la industria.

En la Cumbre del Milenio Celebrada en Nueva York en el año 2000 se firmó la declaración del milenio⁴. Con base en ésta se formularon los objetivos del milenio que son:

- ✓ Reducir a la mitad la pobreza
- ✓ Lograr la enseñanza primaria universal
- ✓ Promover la igualdad entre los sexos
- ✓ Reducir la mortalidad infantil
- ✓ Mejorar la salud materna
- ✓ Combatir el VIH/SIDA, el paludismo y otras enfermedades
- ✓ Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente
- ✓ Fomentar una asociación mundial para el desarrollo

Estos ocho objetivos del milenio agrupan 18 metas y cerca de 40 indicadores. Fueron trazados en el año 2000, con la meta de ser alcanzados en el año 2015. Fueron concebidos como objetivos comunes a todas las naciones y el gran objetivo que enmarcaba a los demás era reducir la pobreza.

Es evidente, que los diversos campos de la Ingeniería Civil juegan un rol decisivo en el cumplimiento de los objetivos del milenio, esto se hace evidente cuando la ONU afirma en materia de vivienda⁵, que el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de los tugurios implica, más que un mejoramiento físico de la vivienda, un acceso a condiciones económicas, sociales y ambientales. Estas condiciones para el mejoramiento de la calidad de vida de las poblaciones marginadas pueden asociarse a planes de urbanismo y mejoramiento, inversión en mobiliario urbano entre otros.

³ORGANIZACION INTERNACIONAL Del TRABAJO, programa de actividades sectoriales. La industria de la construcción en el siglo XXI: su imagen, perspectivas de empleo y necesidades en materia de calificaciones. [en línea]: Colombia. [fecha de consulta: 24 de Agosto de 2015]. Disponible en: <http://www.ilo.org/public/spanish/standards/relm/gb/docs/gb283/pdf/tmcitr.pdf>

⁴PROGRAMA DE DESARROLLO PARA LAS NACIONES UNIDAS EN COLOMBIA. Objetivos del milenio ¿que son los ODM? [en línea]: Colombia. [fecha de consulta: 13 de julio de 2015]. Disponible en: <http://www.pnud.org.co/sitio.shtml?apc=h-a-1--&s=a&m=a&e=A&c=02010#.VaUQfl-qgkq>

⁵NACIONES UNIDAS. Objetivos del desarrollo del milenio: una mirada desde América Latina y el Caribe. 2005. Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente. Página 179.

Según el programa de las naciones unidas para los asentamientos humanos⁶, para el año 2000, cerca de 940 millones de personas vivían en alojamientos precarios, cerca del 13 % de estas personas se encontraban en zonas de América latina, dichas zonas según el mismo informe se caracterizaban por viviendas deterioradas en el centro del núcleo urbano y viviendas informales en la periferia y zonas de riesgo con un acceso inadecuado a servicios básicos. La precariedad de una vivienda se determina, según la ONU⁷, con base en 5 indicadores que son:

- ✓ Acceso a fuentes mejoradas de agua potable
- ✓ Acceso a sistemas de saneamiento mejorados
- ✓ Área suficiente para vivir
- ✓ Durabilidad de la vivienda
- ✓ Tenencia segura (protección del estado frente a desalojos forzosos)

La Ingeniería Civil como área responsable de dar respuestas a problemáticas sentidas como la vivienda de interés social, el saneamiento básico, la planificación urbana entre otros, tiene gran importancia en la mejora de las realidades de nuestra nación.

Cesar Augusto García Ubaque 

DIRECTOR

cagarciau@udistrital.edu.co

⁶POGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS (NACIONES UNIDAS-HÁBITAT), citado por NACIONES UNIDAS. Objetivos del desarrollo del milenio: una mirada desde América Latina y el Caribe. 2005. Panorama regional del Medio ambiente construido. Página 192.

⁷UN-HABITAT. Global Report On Human Settlements 2003: Slums of the World: The face of urban poverty in the new millennium citado por ÁLVAREZ de ANDRÉS, Eva. Análisis de la situación actual de la habitabilidad precaria en el mundo y alcance de los Objetivos de Desarrollo del Milenio [en línea]: España. [fecha de consulta: 14 de julio de 2015]. Disponible en: www.2015ymas.org/documentos_ver.asp?id=41

Today's world presents challenges for all kinds of activities and knowledge. Developed technologies and techniques give an unprecedented boost to human growth; and have also imposed changes in lifestyle for the bulk of the population worldwide, in different ways towards ensuring a responsible and dignified development.

In 1972 with United Nations Stockholm Summit, was revealed for the first-time concern about the effects and responsibilities of the human being as a builder of their own environment. In 1987 with the document "Our Common Future" product of the first meeting of the "World Commission on Environment and Development", the concept of sustainable development was defined: *"satisfying the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs"*¹. In 1992 with the Earth Summit in Rio de Janeiro, "The Rio Declaration on Environment and Development", describes the importance of technological exchange and research; and was enacted the need to overcome poverty as a fundamental requirement for sustainable development, and the importance of environmental protection in every aspect of any country development.

The features of environmental responsibility implicit in sustainable development can go unnoticed in important development spectra as the economy and social realities. With United Nations Johannesburg Summit in 2002 became visible the social spectrum of sustainable development, *"The summit recognized that the basis for achieving sustainable development passed by solving the problem of poverty and reduce the gap between rich and poor"*². In the same way and in accordance with the evolution concept, UN established as pillars of sustainable development: economic development, environmental conservation, and social equity.

The Civil Engineering as a generator discipline of knowledge and solutions in many fields of human interest (housing, basic sanitation, risk management and territory), has great influence on the development and impact on various sectors of human environment; not only direct impacts on the ecological aspects, but also in areas such economy, politics, and even the social structure of a nation.

According to the International Labor Organization in the report "The construction industry in the twenty-first century: its image, employment prospects and needs grading" the construction industry in developing countries is an important sector that provides and creates jobs and employment opportunities for a large proportion of vulnerable population while *"has the ability to absorb the excluded, provides employment for those with little education or skill, many of them from the more layers poorest in society"*³, also in developed countries has a dynamic growth and is an important percentage of the

¹NACIONES UNIDAS. Desarrollo sostenible: antecedentes [en línea]: Colombia. [fecha de consulta: 20 de agosto de 2015]. Disponible en: <http://www.un.org/es/ga/president/65/issues/sustdev.shtml>

²ÁNGEL VEGA, José Luis. Responsabilidad social y los principios del desarrollo sostenible como fundamentos teóricos de la información social de la empresa. ESIC. España. 2009. Página 105, Evolución del concepto de desarrollo sostenible.

³ORGANIZACION INTERNACIONAL Del TRABAJO, programa de actividades sectoriales. La industria de la construcción en el siglo XXI: su imagen, perspectivas de empleo y necesidades en materia de calificaciones. [en línea]: Colom-

investment making it an important sector of the industry.

At the Millennium Summit held in New York in 2000, the Millennium Declaration⁴ was signed. Based on this the millennium goals are formulated:

- ✓ Halve Poverty
- ✓ Achieve universal primary education
- ✓ Promote gender equality
- ✓ Reduce child mortality
- ✓ Improve maternal health
- ✓ Combat HIV / AIDS, malaria, and other diseases
- ✓ Ensure environmental sustainability
- ✓ Promote a world association for development

These eight goals, grouped 18 targets and about 40 indicators. They were drawn in 2000, with the goal to be achieved by 2015. They were conceived as common objectives of all nations and the great goal framing others was to reduce poverty.

It is evident that the various fields of Civil Engineering play a decisive role in meeting the Millennium Development Goals, this becomes evident when the UN says about housing⁵, that improving the quality of life of the inhabitants of the slum involves more than a physical improvement of housing, access to economic, social and environmental conditions. These conditions for improving the quality of life of marginalized populations may be associated with urban planning and improvement, investment in urban equipment, among others. According to the UN program for human settlements⁶, in 2000, about 940 million people lived in precarious housing; about 13% of these people were in Latin America. According to the same report, these areas were characterized by dilapidated housing in the center of the village and informal housing in the periphery and risk areas with

bia. [fecha de consulta: 24 de Agosto de 2015]. Disponible en: <http://www.ilo.org/public/spanish/standards/relm/gb/docs/gb283/pdf/tmcitr.pdf>

⁴PROGRAMA DE DESARROLLO PARA LAS NACIONES UNIDAS EN COLOMBIA. Objetivos del milenio ¿que son los ODM? [en línea]: Colombia. [fecha de consulta: 13 de julio de 2015]. Disponible en: <http://www.pnud.org.co/sitio.shtml?apc=h-a-1--&s=a&m=a&e=A&c=02010#.VaUQfl-qkqk>

⁵NACIONES UNIDAS. Objetivos del desarrollo del milenio: una mirada desde América Latina y el Caribe. 2005. Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente. Página 179.

⁶PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS (NACIONES UNIDAS-HÁBITAT), citado por NACIONES UNIDAS. Objetivos del desarrollo del milenio: una mirada desde América Latina y el Caribe. 2005. Panorama regional del Medio ambiente construido. Página 192.

inadequate access to basic services. The precariousness of housing is determined, according to the UN⁷, in five indicators:

- ✓ Access to improved water
- ✓ Access to improved sanitation
- ✓ Sufficient area to live
- ✓ Housing durability of
- ✓ Tenure Security (state protection against forced evictions)

Civil Engineering responsible for giving answers to problems as social housing, basic sanitation, and urban planning, among others; has great importance in improving the realities of our country.

Cesar Augusto García-Ubaque 

DIRECTOR

cagarcau@udistrital.edu.co

⁷UN-HABITAT. Global Report On Human Settlements 2003: Slums of the World: The face of urban poverty in the new millennium citado por ÁLVAREZ de ANDRÉS, Eva. Análisis de la situación actual de la habitabilidad precaria en el mundo y alcance de los Objetivos de Desarrollo del Milenio [en línea]: España. [fecha de consulta: 14 de julio de 2015]. Disponible en: www.2015ymas.org/documentos_ver.asp?id=41

Magnetic Barkhausen Noise Measurements on Rocks

Mediciones del Ruido Magnético Barkhausen en rocas

Miriam Rocío Neyra Astudillo ¹, María Isabel López Pumarega ²,
Silvana Evangelina Geuna ³, Martín Pedro Gómez ⁴

Fecha de Recepción: 26 de octubre de 2021

Fecha de Aceptación: 20 de abril de 2022

Cómo citar: Neyra Astudillo., M.R. López Pumarega., M.I. Geuna., S.E. y Gómez., M.P. (2022). Magnetic Barkhausen Noise Measurements on Rocks. *Tecnura*, 26(73), 18-29. <https://doi.org/10.14483/22487638.17148>

Abstract

Context: The magnetic properties of rocks may reflect the modal abundance, composition, and microstructure of the magnetic grains contained within them, usually in a very small proportion. Magnetic Barkhausen Noise (MBN) is a non-destructive technique applied to magnetic materials, and it is very sensitive to microstructure and residual stresses. In this work, measurements of MBN in samples of rocks extracted from nature and containing varying proportions of magnetite were studied and analyzed.

Method: Measurements were taken by magnetically exciting the cylindrical samples, using a magnetic yoke and measuring the induced field inside the rock as a consequence of the excitation. For the detection, a sensor coil placed on the excited surface on one of the flat faces of each cylinder was used. The signals obtained from the MBN were digitized, and a digital 5-200 kHz Butterworth filter was applied, calculating the root mean square (RMS) values.

¹Bachelor of Physics, Department of Natural Sciences and Mathematics, Universidad Federico Villarreal, Lima, Perú. PhD in Science and Technology with an emphasis on Materials, IT Sabato, Universidad de San Martín, Argentina. Professor at the Delta Regional Faculty, Universidad Tecnológica Nacional, Campana, Argentina. International Center for Earth Studies (ICES) project. Constituyentes Atomic Center, National Atomic Energy Commission (CNEA), Buenos Aires, Argentina.

Email: neyra@cnea.gov.ar

²Bachelor of Physical Sciences, Department of Exact and Natural Sciences, Universidad de Buenos Aires, Argentina. PhD in Physics, Department of Exact and Natural Sciences, Universidad de Buenos Aires, Argentina. ICES department, National Atomic Energy Commission (CNEA), Buenos Aires, Argentina.

Email: ilopezpumarega@gmail.com

³Bachelor of Geological Sciences (Universidad de Buenos Aires). PhD in Geological Sciences (Universidad Nacional de Córdoba). Specialist in Rock Paleomagnetism. Associate professor (Internal Geodynamics) of Universidad de Buenos Aires. Rosario de Lerma, Argentina.

Email: geuna@gl.fcen.uba.ar

⁴Bachelor of Physical Sciences, Universidad de Buenos Aires. Master of Materials Science and Technology and PhD in Science and Technology with an emphasis on Materials, IT Sabato, Universidad de San Martín, Argentina. Associate professor, Delta Regional Faculty, Universidad Tecnológica Nacional, Campana, Argentina. Scientific director of the International Center for Earth Studies (ICES). Head of the ICES department, Constituyentes Atomic Center, National Atomic Energy Commission (CNEA), Buenos Aires, Argentina.

Email: mpgomez@cnea.gov.ar

Results: The linear fit of the MBN RMS values with the increasing percentage of ferromagnetic minerals showed an increasing trend with a moderate correlation. A correlation between coercive force and the MBN RMS values was observed only for samples with abundant magnetite (>25 vol %).

Conclusions: An increasing variation of the RMS values of the MBN signals was observed in relation with coercive force for abundant magnetite samples. This may be related to the geological processes involved in magnetite genesis.

Keywords: rocks, magnetization, Magnetic Barkhausen Noise, non-destructive test.

Resumen

Contexto: Las propiedades magnéticas de las rocas pueden reflejar la abundancia modal, la composición y la microestructura de los granos magnéticos que estas contienen, usualmente en muy pequeña proporción. El ruido magnético Barkhausen (RMB) es una técnica no destructiva que se aplica en materiales magnéticos y es muy sensible a la microestructura y a las tensiones residuales. En este trabajo se realizan mediciones para estudiar el RMB en muestras de rocas extraídas de la naturaleza que contienen proporciones variables de magnetita.

Método: Se realizaron mediciones excitando magnéticamente cada una de las muestras cilíndricas mediante un yugo magnético y midiendo el campo inducido en la roca como consecuencia de la excitación. Para la detección se utilizó una bobina sensora colocada sobre la superficie excitada en una de las caras planas de cada cilindro. Se digitalizaron las señales obtenidas de RMB y se les aplicó un filtro digital Butterworth de 5-200 kHz, calculándose el valor cuadrático medio (RMS).

Resultados: El ajuste lineal de los valores del RMS de RMB con el porcentaje progresivo de minerales ferromagnéticos mostró una tendencia creciente con una correlación moderada. Se observó una correlación entre la fuerza coercitiva y los valores RMS del RMB solo para muestras con abundante magnetita (>25 vol %).

Conclusiones: Se observó una variación creciente de los valores RMS de las señales de RMB en relación con la fuerza coercitiva para muestras con magnetita abundante. Esto puede estar relacionado con los procesos geológicos involucrados en la génesis de la magnetita.

Palabras clave: rocas, magnetización, Ruido Magnético de Barkhausen, ensayo no destructivo.

Table of Contents

	Page
Introduction	20
Methodology	21
Materials	21
MBN measurement system	23
Results and discussion	23
Conclusion	26
Funding	27
References	27

INTRODUCTION

Rocks and minerals, as natural materials, show a wide degree of variation in their physical properties, and measuring some of these properties often serves as a way for rapid and/or precise characterization (Hoyos-Palacio *et al.*, 2015, Filipussi *et al.*, 2019, Ferrari & Gómez, 2020).

Rocks can record some of the characteristics of the existing magnetic field at the time of their formation. An important field of geology, paleomagnetism, aims to determine the natural remanent magnetization (NRM) of rocks and interpret it in terms of significant geological events (Butler, 1992, Dunlop & Özdemir, 1997, Valencio, 1980).

Rock magnetism is a field that studies the behavior and magnetic properties of different types of rocks and minerals found in nature. The magnetic characterization of a sample requires measuring various parameters such as magnetic susceptibility, magnetic hysteresis cycles, isothermal/an hysteretic remanence acquisition curves, among others. All these parameters provide essential information to identify the various ferromagnetic minerals present in a sample and their magnetic state (superparamagnetic, single-domain, pseudo-single domain, multidomain), which mainly depends on the size and shape of the grains or crystals (Dunlop & Özdemir, 1997, Ivanchenko *et al.*, 2012).

Rock magnetic studies are usually carried out in addition to any paleomagnetic study, with the purpose of determining what ferromagnetic minerals are carrying the NRM, which can have important implications regarding its origin, stability, and history of acquisition.

In addition, knowing the microphysics of minerals constitutes an interesting field of research. It is also a fundamental tool for environmental or paleoenvironmental magnetism, which attempts to characterize the magnetic phases present in recent or ancient sediments and their variation, both spatial and temporal. Moreover, the connection between environmental or paleoenvironmental parameters and the presence and state of one or more ferromagnetic minerals allows extracting important information (Chaparro *et al.*, 2014).

Magnetism in rocks is carried by a few minerals, the most important of which are iron and titanium oxides, such as magnetite and hematite (Stacey & Banerjee, 1974, Dunlop & Özdemir, 1997).

Destructive and non-destructive magnetic measurements are taken in the different rock magnetic studies. Magnetic Barkhausen Noise (MBN) is a non-destructive testing technique that is widely used for the microstructural characterization of magnetic materials. This technique is mainly based on the irreversible movements of the walls of the magnetic domains that must overcome pinning points such as grain edges, dislocations, impurities, etc. These imperfections impede the movement of the domain walls until an increase in the applied magnetic field provides the necessary energy to free the walls from these obstacles. These pinning points produce a sudden jump in magnetization, which causes a flux change called MBN (Jiles, 1991, Stefanita, 2008, Neyra Astudillo, 2017, Neyra Astudillo *et al.*, 2018).

In this work, the MBN method is attempted as an alternative technique to study the magnetic characteristics of rock samples that contain different variable proportions of ferromagnetic minerals such as magnetite (Fe_3O_4). This work evaluates the feasibility of applying the MBN method in the study of magnetic rocks, as there are no references to it in the literature.

METHODOLOGY

Measurements were carried out on 11 cylindrical samples containing different percentages of magnetite. The MBN was measured on the two circular flat faces. The magnetic yoke was fed with a variable current used to generate the excitation field. The variation of the RMS value of the MBN signals was observed in relation to the known magnetic properties of the studied rocks.

Materials

Magnetite (Fe_3O_4) usually appears in common rocks of the earth's crust as an accessory mineral, that is, in abundances that rarely reach a few percentage points. For this work, samples of ore deposits characterized by a high volume percentage of magnetite were studied, which varied from massive (>50 vol %) to disseminated ore (with concentrations around 5 vol %), belonging to IOCG, BIF, porphyry, and skarns deposits (Table 2). They were cut as cylinders with 23 mm diameter and 20 mm height. The samples were previously demagnetized by applying linearly decreasing alternating

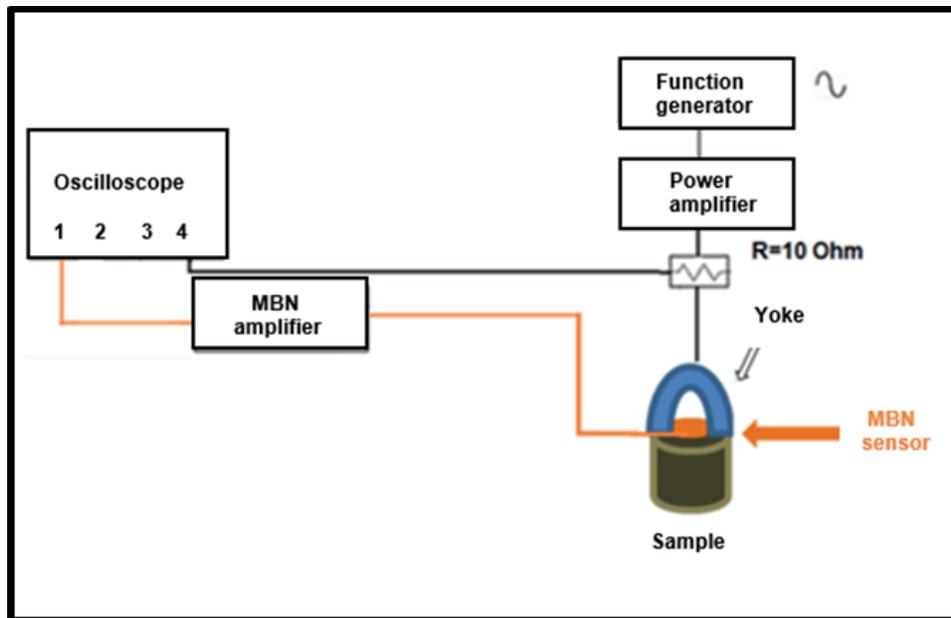


Figure 1. Scheme of the MBN measurement system

Source: Authors.

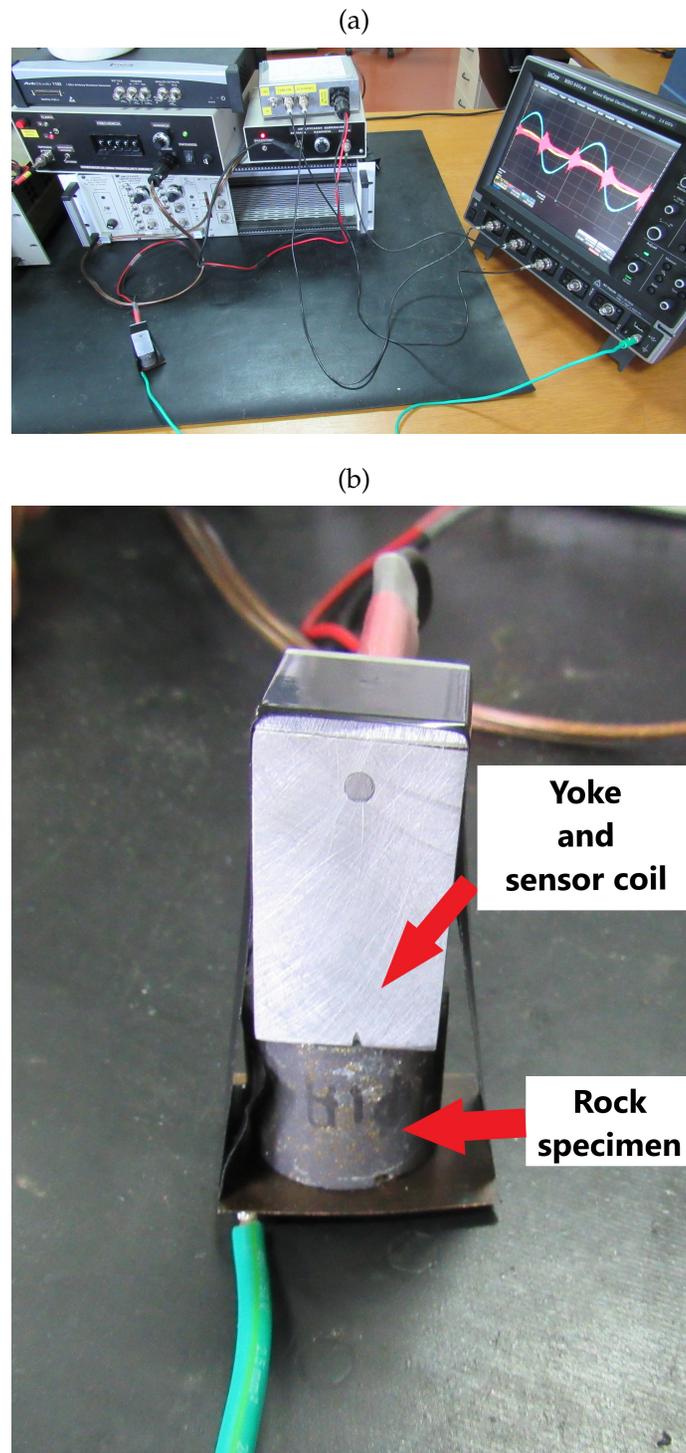


Figure 2. a) Photograph of the measurement system, b) magnetic yoke and sensor coil positioned over the specimen

Source: Authors.

magnetic fields (AF). The demagnetization of the NRM was completed with fields of low intensity (about 20-30 mT), which indicates that, in all cases, the magnetite is predominantly in a multidomain state. Table 1 indicates the median destructive field of NRM obtained from AF demagnetization, a measure of the coercive force. Other properties of the specimens such as volume, density, and magnetic susceptibility are also included, which were determined at the Paleomagnetism Laboratory of IGEBa. For illustrative purposes, a column is also included with the approximate estimation of the volume percentage of magnetite, calculated from the value of magnetic susceptibility using the relations of Clark and Emerson (1991), and assuming that magnetite is the only ferromagnetic mineral in the samples. Table 2 indicates the origin of each of the samples along with their geological characterization.

MBN measurement system

The diagram in Figure 1 shows the scheme of the measurement system. The tests were carried out using a magnetic yoke as an excitation source. This yoke was placed on each of the flat faces of the samples. The magnetic sensor coil was held between the magnetic yoke arms. The excitation magnetic field was achieved with a 10 Hz sinusoidal current produced by a Stanford function generator with a maximum voltage of 8 V, which was then amplified. The excitation and detection procedures were performed on the two circular faces of the cylindrical specimen, and then both results were averaged. Measurements were made with a four-channel digital oscilloscope (LeCroy Wave Runner 44MXi). Digitization was performed with a sampling frequency of 5 Ms/s, repeating each measurement five times on each face and considering their averages. In this way, the current on the yoke, the MBN signals, and the excitation voltage were recorded in three channels of the oscilloscope. Figure 2a shows the photograph of the measurement system. In Figure 2b, the magnetic probe (yoke and sensor coil) is positioned over a sample.

To study the MBN signals, they were first digitally filtered in order to reduce the influence of noise. To this effect, a 4th-order Butterworth-type band pass filter in the range between 5 and 200 kHz was applied to the signals. Then, the RMS (root mean square) value of each filtered signal was calculated, and the corresponding averages were determined.

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 3 shows the MBN signals (blue) for specimen S10 after they were filtered. They were obtained by exciting the yoke (red). From the filtered signals, the RMS value of the MBN was calculated for two complete cycles of excitation.

In Figure 4, the average of the RMS values evaluated in both opposite flat faces of the samples was plotted as a function of the bulk magnetic susceptibility for all the specimens. As magnetic susceptibility depends on the amount of ferromagnetic minerals present in the sample, the slight increasing

Table 1. Rock magnetic and petrophysical characterization of each sample

Code	Volume (cm ³)	Density (g/cm ³) (1)	Bulk susceptibility (SI) (2)	Median destructive field (mT) (3)	Approximate magnetite vol % (4)
S01	10,2	2,62	0,143	11,0	4
S02	10,5	2,72	0,255	9,5	7
S03	10,4	2,90	0,468	3,5	12
S04	10,2	3,34	0,863	2,0	21
S05	10,3	3,11	1,379	4,5	30
S06	10,3	3,47	1,586	6,0	33
S07	10,2	3,24	2,195	1,5	42
S08	9,7	3,92	2,654	8,5	47
S09	10,4	4,46	3,519	12,5	55
S10	9,9	4,32	4,576	16,0	63
S11	10,2	4,63	4,874	11,0	65

(1) Determined by immersion method. **(2)** Measured with Kappabridge MFK1-FA Agico, property of IGEBA (UBA-CONICET), using a field of 200 A/m, corrected by self-demagnetization. **(3)** Obtained from AF demagnetization curves. **(4)** Estimated from magnetic susceptibility according to Clark and Emerson relations (1991).

Source: Authors

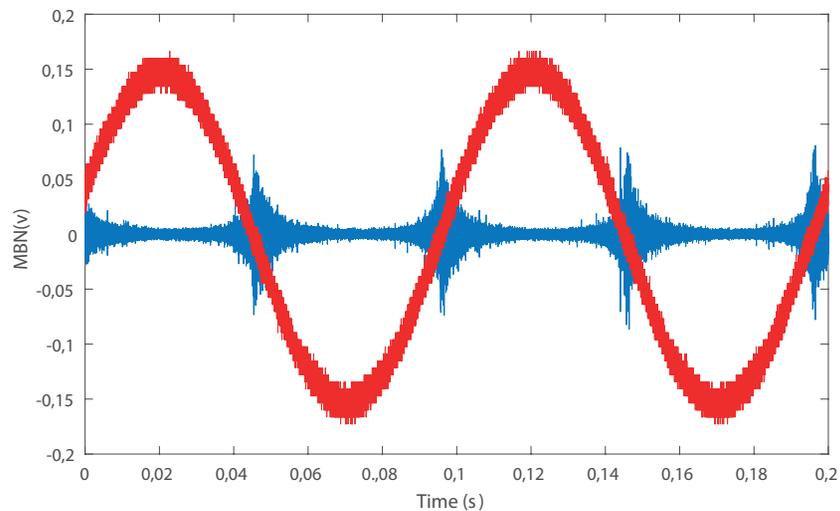


Figure 3. Excitation (red) and filtered MBN (blue) signals for sample S10

Source: Authors.

Table 2. Origin of the analyzed samples

ID	Origin
S01	Stockwork with phyllic alteration, Grasberg porphyry, Indonesia
S02	Lower andesite, Candelaria IOCG, Chile
S03	Banded Iron Formation (BIF), Eyre Peninsula, South Australia
S04	
S05	Stockwork, Grasberg porphyry, Indonesia
S06	Skarn Ertsberg, Grasberg, Indonesia
S07	Banded Iron Formation (BIF), Eyre Peninsula, South Australia
S08	Magnetite breccia in lower andesite (magnetite-chalcopyrite), Candelaria IOCG, Chile
S09	Skarn Doz, Grasberg, Indonesia
S10	Lower andesite with chalcopyrite, Candelaria IOCG, Chile
S11	Lower andesite, Candelaria IOCG, Chile

BIF (banded iron formation): chemically precipitated sedimentary rocks, most of them during the Archean, probably coinciding with the oxygenation of the oceans leading to massive precipitation of iron oxides. Most BIFs are highly metamorphosed. **IOCG** (iron oxide copper gold ore deposits): copper-gold ores within iron oxide dominant gangue. They are metasomatic rocks formed due to large alteration events driven by intrusive activity. **Skarn**: metasomatic rocks formed by the replacement of carbonate rocks caused by contact with an intrusive body. **Stockwork**: a system of veins developed in the core of porphyry copper-gold deposits in response to high-temperature hydrothermal alterations in calc-alkaline intrusions.

Source: Authors

trend observed in the figure indicates that the greater the amount of magnetite, the more intense the RMS of the MBN measured. This is particularly true for samples with lower magnetite contents, since the magnetite surfaces in contact with the sensor are smaller. However, for samples with more than, say, 20 vol % magnetite, the effect of concentration becomes less significant, and the correlation worsens.

In Figure 5, the RMS value is plotted for each test piece as a function of the median destructive magnetic field (shown in Table 1), which is considered to be indicative of the coercive force of the material. For multidomain materials, the coercive force increases with the presence of greater domain wall pinning and dislocations. Samples with lower magnetic susceptibility (S01 and S02) are clear outliers of any trend. For these samples, the very low values of the measured RMS are due to the low magnetite concentration, as previously discussed. For the rest of the samples, there is a linear relationship between the RMS value and the coercive force, with a positive correlation ($R^2=0,605$). In particular, the BIF samples are the ones with the lowest RMS and coercive force, which is possibly due to recrystallization effect experienced by these samples (S03, S04, S07) during metamorphism, which

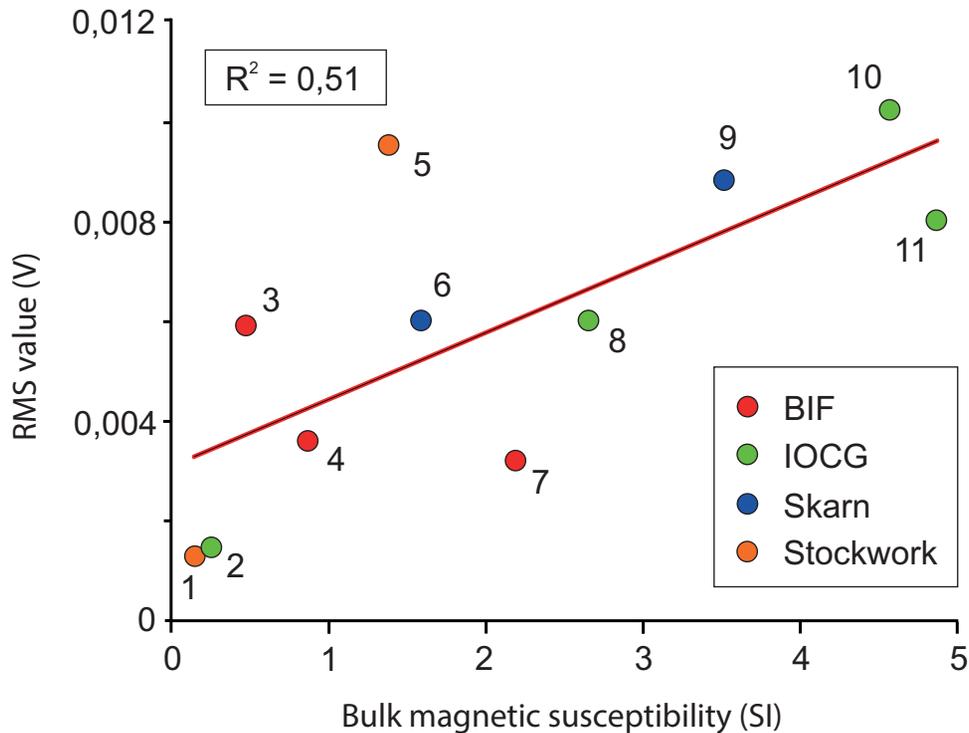


Figure 4. Graph of the RMS values as a function of the bulk magnetic susceptibility for all specimens (only the numbers in the rock IDs are shown)

Source: Authors.

leads to annealing with the consequent decrease in wall pinning. At the other extreme, magnetites of metasomatic origin (S06, S08, S09, S10, S11) have higher values of coercivity and RMS, possible evidence of the effect of impurities and/or stress.

Other mechanisms could be studied to explain the fluctuation in the RMS value. This is an initial approach, and those relationships will be evaluated in future works.

CONCLUSION

This was the first time in Argentina that samples of rocks with different origins and varying proportions of magnetite were studied via the MBN technique.

The linear adjustment of the RMS values of the MBN with respect to the percentage of ferromagnetic minerals and magnetic susceptibility showed an increasing trend. A positive correlation was observed between the coercive force (estimated from the median destructive field) and the RMS of the MBN. The researchers interpret that the technique is sensitive to the abundance of magnetic material and that, for massive magnetite samples, it is sensitive to coercivity. In turn, this is conditioned

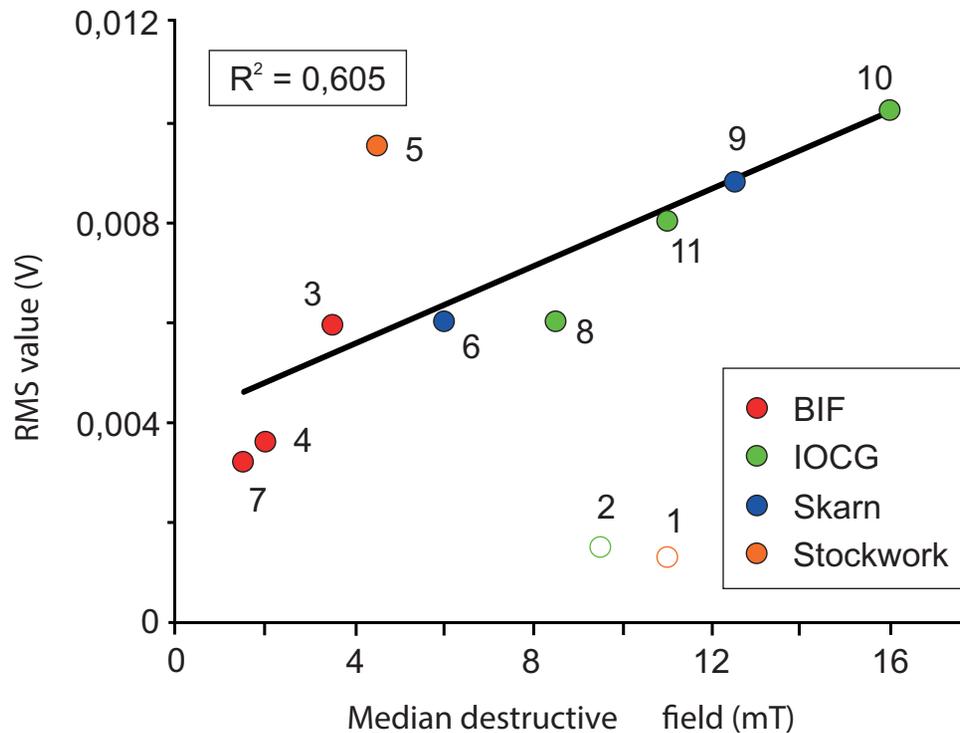


Figure 5. Graph of the RMS values as a function of median destructive field of the natural remanent magnetization (only the numbers of the rocks are showed). Open symbols are used for outliers (samples with low RMS due to low magnetite concentration)

Source: Authors.

by the geological history of the sample: metamorphosed rocks have lower RMS values, whereas rocks of metasomatic origin (particularly skarns and IOCG) have higher RMS values and coercive force.

FUNDING

This research, associated with the ICES (International Center of Earth Sciences) project, was endorsed and funded by the National Atomic Energy Commission.

REFERENCES

[Butler, 1992] Butler, R. F. (1992). *Paleomagnetism: From magnetic domains to geologic terranes*. Blackwell Scientific Publications. [↑Ver página 20](#)

- [Chaparro *et al.*, 2014] Chaparro, A. E., Gargiulo, J. D., Irurzun, M. A., Chaparro, M. A. E., Lecomte, K. L., Böhnel, H. N., Córdoba, F. E., Vignoni, P. A., Manograsso, C. N. T., Lirio, J. M., Nowaczyk, N. R., & Sinito, A. M. (2014). El uso de parámetros magnéticos en estudios paleolimnológicos en Antártida. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 21(2), 77-96. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=381741102002> ↑Ver página 20
- [Clark & Emerson, 1991] Clark, D. A., & Emerson, D. W. (1991). Notes on rock magnetization characteristics in applied geophysical studies. *Exploration Geophysics*, 22, 547-555. <https://doi.org/10.1071/EG991547> ↑Ver página
- [Dunlop & Özdemir, 1997] Dunlop, D. J., & Özdemir, Ö. (1997). *Rock magnetism: Fundamentals and frontiers*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612794> ↑Ver página 20
- [Ferrari & Gómez, 2020] Ferrari, G. C., & Gómez, M. P. (2020). Caracterización de etapas de perforado en probetas multicapas mediante la emisión acústica generada durante la perforación. *Tecnura*, 24(63), 26-39. <https://doi.org/10.14483/22487638.16193> ↑Ver página 20
- [Filipussi *et al.*, 2019] Filipussi, D. A., Muszkats, J. P., Sassano, M. P., Zitto, M. E., & Piotrkowski, R. (2019). Fractura de roca andesita y análisis espectral de señales de emisión acústica. *Tecnura*, 23(61), 45-56. <https://doi.org/10.14483/22487638.15361> ↑Ver página 20
- [Hoyos-Palacio *et al.*, 2015] Hoyos-Palacio, L. M., Espinel-Blanco, E., & Quintero-Martínez, Y. (2015). Caracterización fisicoquímica de cuarzo en el municipio de La Playa de Belén, departamento de Norte de Santander. *Tecnura*, 19(45), 41-52. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a03> ↑Ver página 20
- [Ivanchenko *et al.*, 2012] Ivanchenko, V. S., Glukhikh I. I., Strokina, L. G., & Kheinson A. P. (2012). Magnetoacoustic emission of magnetites. *Russian Geology and Geophysics*, 53(2), 214-220. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.12.018> ↑Ver página 20
- [Jiles, 1991] Jiles, D. (1991). *Introduction to magnetism and magnetic materials*. Chapman and Hall. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3868-4> ↑Ver página 20
- [Neyra Astudillo, 2017] Neyra Astudillo, M. R. (2017). *Caracterización de materiales con técnicas de ruido magnético Barkhausen y emisión magneto acústica* [Doctoral thesis, Universidad Nacional de General San Martín]. <https://www.cnea.gob.ar/nuclea/handle/10665/1572> ↑Ver página 20
- [Neyra Astudillo *et al.*, 2018] Neyra-Astudillo, M. R., Núñez, N., López-Pumarega, M. I. Ruzzante, J., & Padovese-Rodríguez (2018). Ruido magnético Barkhausen para el estudio de la anisotropía magnética en aceros inoxidables. *Revista Materia*, 23(2), 12118. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180002.0452> ↑Ver página 20

[Stacey & Banerjee, 1974] Stacey, F. D., & Banerjee, S. K. (1974). *The physical principles of rock magnetism*. Elsevier. ↑Ver página 20

[Stefanita, 2008] Stefanita, C. G. (2008). *From bulk to nano: The many sides of magnetism*. Springer .
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-70548-2> ↑Ver página 20

[Valencio, 1980] Valencio, D. A. (1980). *El magnetismo de las rocas: su aplicación geológica, la deriva continental, la tectónica de placas y otros problemas geofísicos y geológicos*. EUDEBA. ↑Ver página 20



Modelos computacionales en la posturografía

Computational models in posturography

Lely Adriana Luengas Contreras¹, Luis Felipe Wanumen Silva²

Fecha de Recepción: 26 de mayo de 2021

Fecha de Aceptación: 20 de abril de 2022

Cómo citar: Luengas-Contreras., L.A. y Wanumen-Silva., L.F. (2022). Modelos computacionales en la posturografía. *Tecnura*, 26(73), 30-48. <https://doi.org/10.14483/22487638.18060>

Resumen

Objetivo: Realizar la clasificación y el mapeo de parámetros de balanceo corporal a partir de datos de posturografía estática para diferenciar individuos amputados transtibiales unilaterales de no amputados, utilizando técnicas de aprendizaje automático y minería de datos.

Metodología: El balanceo corporal se midió en 74 individuos, 37 amputados por mina antipersonal y 37 controles sanos. Se clasificó la estabilidad según el grupo, mediante el uso de aprendizaje automático. Se desarrolló un mapa bidimensional continuo de las alteraciones de la postura, a partir de la teoría de la información de Shannon. La prueba de U Mann-Whitney ($p < 0,05$) fue usada con el fin de identificar diferencias entre grupos.

Resultados: Se entrenaron cinco algoritmos de aprendizaje automático, un árbol de decisión, reglas de decisión, una red neuronal, una máquina de soporte vectorial y el clúster. La validación y la comparación se llevaron a cabo con las métricas obtenidas de la matriz de confusión, por validación cruzada para obtener dos subconjuntos. La condición de postura más discriminatoria se clasificó como el desplazamiento del centro de presión (CoP, por su sigla en inglés), lado no amputado (contralateral), dirección anteroposterior. El algoritmo de mayor desempeño fue la máquina de soporte vectorial, y el de menor desempeño, el clúster; sin embargo, todos los modelos realizaron clasificación de grupos con una puntuación F1 mayor a 0,4.

Conclusiones: El mapeo de las características del desplazamiento del balanceo en el espacio 2D reveló agrupaciones claras entre amputados y controles, lo cual confirma que el aprendizaje automático puede ayudar en la clasificación de patrones de balanceo clínico medidos con posturografía estática. Los modelos computacionales permiten evaluar de forma objetiva la estabilidad, así como reconocer el aporte de la extremidad contralateral en el control de la postura bípeda estática ya que compensa la no existencia de los aferentes y eferentes de ipsilateral.

Financiamiento: Artículo de investigación científica derivado del proyecto de investigación "Caracterización de la estabilidad en amputados transtibiales unilaterales", financiado por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

Palabras clave: amputados transtibiales, aprendizaje automático, estabilidad estática, modelos computacionales.

¹Doctor en Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Email: laluengasc@udistrital.edu.co

²Magister en Ingeniería de Sistemas y Computación. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Email: lwvanumen@udistrital.edu.co

Abstract

Objective: To perform the classification and mapping of body sway parameters from static posturography data to differentiate unilateral transtibial amputees from non-amputees using machine learning and data mining techniques.

Methodology: Body sway was measured in 74 individuals, 37 landmine amputees and 37 healthy controls. Stability was classified by group using five machine learning algorithms. A continuous two-dimensional map of posture alterations was developed using Shannon's information theory, the U Mann-Whitney test ($p < 0,05$) was used to identify differences between groups.

Results: Five machine learning algorithms (decision tree, decision rules, neural network, vector support machine and clustering) were trained. Validation and comparison were carried out with the metrics obtained from the confusion matrix, using cross-validation to obtain two subsets. The most discriminatory posture condition was classified as displacement of the center of pressure (CoP) on the non-amputated side, anteroposterior direction. The algorithm with the highest performance was the vector support machine and the one with the lowest performance was the cluster; however, all the models performed group classification with an F1 score greater than 0,4.

Conclusions: Mapping of sway displacement characteristics into 2D space revealed clear clusters between amputees and controls, confirming that machine learning can aid in the classification of clinical sway patterns measured with static posturography. Computational models allow to objectively evaluate the stability, as well as to recognize the contribution of the contralateral limb in the control of the static bipedal posture, since it compensates for the non-existence of the ipsilateral afferents and efferents.

Funding: Scientific research article derived from the research "Characterization of Stability in Unilateral Transtibial Amputees", funded by "Francisco José de Caldas District University".

Keywords: transtibial amputees, machine learning, static stability, computational models.

Tabla de Contenidos

	Página
Introducción	32
Metodología	34
Pacientes y protocolo de estudio	34
Examen posturográfico	34
Análisis	34
Generación de los modelos	35
Resultados	36
Discusión	39
Conclusiones	41
Referencias	42

INTRODUCCIÓN

El desequilibrio postural es un síntoma ambiguo y clave de diversos trastornos tanto musculoesqueléticos como neurológicos; se incluye la amputación, la pérdida adquirida de disfunción de la función sensorial (visual, vestibular o somatosensorial), cerebelosa o extrapiramidal, debido a trastornos degenerativos del cerebro o trastornos funcionales somatomorfos (Cordero-Civantos y Calle-Cabanillas, 2017, Luengas y Toloza, 2019, Peydro de Moya *et al.*, 2005). Algunas de estas afecciones pueden diagnosticarse de manera fácil y confiable mediante síntomas fisiológicos asociados. Otros son difíciles de diferenciar clínicamente y requieren una evaluación cuantitativa adicional de la postura y la marcha. Con este fin, la posturografía estática registra la postura y el comportamiento de balanceo de los pacientes mientras están de pie sobre un sistema de medición de fuerza, ya sea plataforma o plantillas instrumentadas (Haid *et al.*, 2018, Yamamoto *et al.*, 2015). En la posturografía estática, la oscilación del cuerpo (reflejada en los desplazamientos del centro de presión, CoP) se mide y puntúa en función de características específicas, es decir, parámetros característicos que cuantifican la amplitud y varianza del desplazamiento del CoP (Audiffren *et al.*, 2016, Safi *et al.*, 2017).

Las evaluaciones clínicas del control postural, aunque simples y confiables, solo observan el desempeño físico, y carecen de la evaluación de causas adicionales de la inestabilidad postural. Medidas como la posturografía y los análisis de la marcha permiten evaluaciones cuantitativas de la inestabilidad postural (Giovanini *et al.*, 2018, Goble y Baweja, 2018). Sin embargo, la posturografía estática se ha limitado al nivel del estudio de correlación (Funato *et al.*, 2016, Qiu y Xiong, 2015, Rhea *et al.*, 2015, Roman-Liu, 2018), a pesar de que se ha comprobado la existencia de una relación no lineal entre parámetros clásicos (valor del CoP ya sea de desplazamiento, velocidad o valor RMS, por citar algunos) y la estabilidad (Luengas y Toloza, 2020a, Toloza y Zequera, 2017). Por lo anterior, varios investigadores han empleado otros tipos de análisis de datos del centro de presión (Giovanini *et al.*, 2017, Rhea *et al.*, 2014, Şencan *et al.*, 2017, De Vassimon-Barroso *et al.*, 2017). Como se muestra en varios trabajos, la clasificación diagnóstica se puede computarizar mediante el uso de estadísticas multiparámetro (Buldt *et al.*, 2018, Giovanini *et al.*, 2018, Moghadam *et al.*, 2011), también de algoritmos de aprendizaje automático supervisado, como redes neuronales artificiales (RNA), árboles de decisión, reglas de decisión, entre otros (Hahn *et al.*, 2005, Shan *et al.*, 2004).

La identificación de medidas apropiadas para diferenciar los grupos poblaciones con características específicas mediante el uso de técnicas de aprendizaje automático, ha facilitado la observación del desempeño de varios enfoques (Luengas y Penagos, 2016, Rosado Gómez y Verjel Ibáñez, 2015, Sallarte y Castro, 2012). Sun *et al.*, 2019 encontraron que el algoritmo de reglas de predicción permite clasificar resultados como el deterioro del equilibrio, además puede evaluar y catalogar variables con respecto a su capacidad para predecir el resultado de clasificación.

Los árboles de decisión, que usan una característica para dividir un nodo y normalizar el número de muestras que divide, han demostrado una precisión excelente en la discriminación de los partici-

pantes con enfermedad neurológicas en función de la marcha y las medidas posturales (Arora *et al.*, 2014).

El diagnóstico de alteraciones neurofisiológicas se ha validado a partir de la posturografía, donde el análisis de particularidades ha sido un desafío debido a la heterogeneidad de los datos y la variable contribución humana, pero se ha realizado con éxito con el uso de redes neuronales artificiales (Amato *et al.*, 2012).

Por su parte, Gholipour y Arjmand, 2016 recurrieron a redes neuronales para predecir la postura de la columna vertebral, ellos realizaron el entrenamiento de dos redes con datos de postura adquirida en diferentes posiciones, con el fin de conocer la rotación de la columna vertebral con respecto a una posición neutra.

El algoritmo de máquinas de vectores de soporte (SVM, por su sigla en inglés) ha sido empleado exitosamente por Lau *et al.*, 2008 en la clasificación de las condiciones de caminata; mientras que Muniz *et al.*, 2010 lo usaron para evaluar el efecto de la estimulación cerebral profunda en sujetos con enfermedad de Parkinson sobre la marcha, observando que esta técnica ofrece mayores resultados en comparación con el uso sólo de fármacos.

El *clustering*, también conocido como *aprendizaje no supervisado*, o análisis de datos exploratorios, cuyo objetivo es explorar la naturaleza desconocida de una agrupación de datos a través de la separación en subconjuntos de datos finitos y discretos con estructuras naturales, ha permitido desarrollar estrategias para la detección temprana de inestabilidad con el fin de reducir el riesgo de caídas tanto en personas mayores como aquellas con trastornos del equilibrio debido a patologías (Baig *et al.*, 2012).

En los últimos años se han llevado a cabo escasos estudios exploratorios del comportamiento del *centro de presión* (CoP) en amputados transtibiales, en su mayoría se enfocan en términos de tiempo y frecuencia para proporcionar información sobre los mecanismos involucrados en el control de la postura bípeda estática. Tales análisis concluyen que cuanto más irregular o impredecible es la serie, la estabilidad disminuye, y sugieren que la regularidad de la fluctuación de CoP podría considerarse un marcador del control de la postura bípeda; de las medidas más estudiadas se encuentra el desplazamiento del CoP (Albertsen *et al.*, 2017, Luengas y Toloza, 2020b, Sadeghisani *et al.*, 2016).

El presente estudio fue diseñado para verificar el comportamiento de modelos computacionales según el análisis de los desplazamientos bilaterales del CoP, lo que posibilita el análisis del control postural en individuos que sufren de deterioro postural por amputación transtibial unilateral. La estabilidad postural estática en amputados de miembros inferiores no se ha investigado mediante modelos computacionales; estudios anteriores han realizado análisis postural con técnicas que relacionan linealmente la variable de desplazamiento con la estabilidad (Kamali *et al.*, 2013, Kolarova *et al.*, 2013, Lamothe *et al.*, 2010, Molero-Sánchez *et al.*, 2015). Por lo anterior, se propuso emplear cinco algoritmos (reglas de decisión, árboles de decisión, redes neuronales, máquina de soporte vectorial y clúster) para evaluar la estabilidad en la postura bípeda estática en amputados unilaterales transtibiales, a través de medidas posturográficas espaciotemporales como el desplazamiento del CoP. En

este artículo se da a conocer la investigación realizada para la medición y análisis del CoP en dos grupos de estudio (amputados y controles), con los algoritmos mencionados para así comprender la actividad postural que a futuro permitirá mejorar la adaptación de las prótesis.

METODOLOGÍA

Pacientes y protocolo de estudio

Durante la investigación se aplicaron técnicas modernas de aprendizaje automático y extracción de datos a dos clases de subconjuntos en un grupo de datos clínicos con información de 74 personas. El grupo de amputados contó con 37 sujetos amputados transtibiales unilaterales ($31,625 \pm 3,42$ años, 100 % hombres, 100 % amputación por trauma mina antipersonal), reclutados en el Hospital Militar Central. El grupo de no amputados o individuos de control fue de 37 ($56,7 \pm 5,3$, 100 % hombres) sin complicación de salud. Los criterios de inclusión para los participantes con amputación incluyeron la capacidad de permanecer de pie durante 30 s sin ayuda y no poseer trastornos de alteración de estabilidad; en cuanto a los controles sanos, no requerían antecedentes de patología neurológica u ortopédica que pudieran influir en el equilibrio o la movilidad, y la capacidad de permanecer de pie durante 30 s sin ayuda. El protocolo experimental fue aprobado y realizado según las pautas y regulaciones pertinentes del Comité de Bioética de la Investigación de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, y todos los participantes proporcionaron su consentimiento informado por escrito antes de participar.

Examen posturográfico

Se siguió el protocolo de examen posturográfico de [Krafczyk et al., 2006](#). Los sujetos fueron examinados mientras estaban de pie sobre las plantillas instrumentadas marca Pedar® (Novel, Alemania), se empleó una plantilla en cada pie. El protocolo constó de tres ensayos, con un tiempo de 10 s en cada ensayo, durante los cuales los sujetos tenían que mantener la estabilidad en posición erguida estática, pies uno al lado del otro, con los brazos colgando y con la mirada fija en una pared blanca. Los balanceos longitudinal (y) y lateral (x) del cuerpo (CoP en mm) se midieron durante la postura erguida con las plantillas.

Análisis

Se tomaron muestras de los datos de CoP durante 30 s a 50 Hz; estos fueron almacenados y organizados en *MATLAB*®; se estableció que el lado amputado fuera el derecho y el no amputado el izquierdo; luego se trabajaron con un filtro paso bajo (Butterworth de 4.º orden) a 10 Hz ([Buldt et al., 2018](#)); se calculó el desplazamiento del CoP de cada pie y en cada dirección, de lo que se obtuvieron las variables de entrada de la tabla 1. Para comparar las mediciones del desplazamiento entre grupos

de estudio con el fin de encontrar diferencias estadísticamente significativas se utilizó la prueba de U Mann-Whitney (Luengas y Toloza, 2020a) con un nivel de significancia de 0,05.

Tabla 1. Variables utilizadas en la investigación

Variable	Unidades	Definición conceptual
MLI	mm	Desplazamiento del CoP en dirección medio-lateral lado no amputado-izquierdo
API	mm	Desplazamiento del CoP en dirección anteroposterior lado no amputado-izquierdo
MLD	mm	Desplazamiento del CoP en dirección medio-lateral lado amputado-derecho
APD	mm	Desplazamiento del CoP en dirección anteroposterior lado amputado-derecho

Fuente: elaboración propia.

Generación de los modelos

Con el fin de proporcionar resultados significativos en la verificación del desempeño de los modelos computacionales de reglas de decisión, árboles de decisión, redes neuronales, máquina de soporte vectorial y clúster para la identificación de alteración de la estabilidad en amputados transtibiales unilaterales, el procedimiento contempló el preprocesamiento de los datos, la validación cruzada y la clasificación de los datos. El preprocesamiento se realizó mediante la normalización del rango de datos para cada característica de oscilación. La normalización aplicó una transformación a la distribución de media cero ($\mu = 0$) y varianza unitaria ($\sigma^2 = 1$) para cada característica de oscilación. Para la evaluación de la solidez de la clasificación, se empleó la validación cruzada estratificada de k veces; esta proporciona dos subconjuntos, uno de prueba y otro de entrenamiento, a partir del conjunto de datos. Para obtener estadísticas sólidas de validación cruzada se usaron $k = 50$ divisiones aleatorias y estratificadas al 75 % de entrenamiento frente al 25 % de datos de prueba para cada clase. El desempeño de la clasificación se evaluó por medio de métricas de clasificación estándar (precisión, sensibilidad especificidad y F1) derivadas de la matriz de confusión (De la Hoz Manotas *et al.*, 2013, Wu *et al.*, 2018). La precisión se calculó con la ecuación (1):

$$\text{Precisión}(\alpha) = \frac{VN + VP}{VP_i + VN_i + FP_i + FN_i} \quad (1)$$

La sensibilidad se obtuvo con la ecuación (2):

$$\text{Sensibilidad} = \frac{VP}{FN + VP} \quad (2)$$

La especificidad se dedujo con la ecuación (3):

$$\text{Especificidad} = \frac{VN}{FN + FP} \quad (3)$$

Donde, FP son los falsos positivos, VN los verdaderos negativos, VP los verdaderos positivos y FN los falsos negativos.

La medida $F1$ se considera como la media armónica de la precisión y la sensibilidad se calcula mediante la ecuación (4):

$$F1 = 2 \cdot \frac{\text{Sensibilidad} \cdot \text{Precisión}}{\text{Sensibilidad} + \text{Precisión}} \quad (4)$$

Los clasificadores reglas de decisión y árbol de decisión identificaron la importancia de cada característica de entrada, mediante el cálculo de la impureza de disminución media (IDM), definida como el número de veces que se usa una característica para dividir un nodo, ponderada por la cantidad de muestra que divide. En otras palabras, si una característica se usa varias veces para dividir una gran cantidad de datos, se identifica como una característica sustancial.

A través de la técnica de clasificación clúster (*clustering*), se obtuvo un mapa 2D de la distribución del patrón del desplazamiento del CoP. Para esto se empleó la teoría de la información de [Shannon, 2001](#), que arroja una proyección no lineal de los vectores, teniendo en cuenta la cantidad de información que cada uno de ellos posee. La proyección conserva la distribución estocástica de puntos de datos en el espacio de alta dimensión en el espacio de baja dimensión (2D), alineando sus respectivas distribuciones. El mapa 2D permite la evaluación simultánea de la similitud de balanceo relativa de todos los sujetos en el conjunto de datos, junto con la distribución de sus clases de diagnóstico.

La red neuronal se entrenó con los datos adquiridos de las mediciones para establecer la relación no lineal de este complejo sistema a través de la obtención de los patrones de los grupos examinados. El modelo fue una red neuronal convolucional, ya que facilita la clasificación, extracción de características y aprendizaje de transferencia; este tipo de algoritmo emplea varias capas ocultas con el fin de reconocer características complejas con las que se detectan o categorizan objetos.

La máquina de soporte vectorial implementada tenía kernel gaussiano, puesto que se ha verificado su alto desempeño al resolver problemas no lineales en dimensiones superiores donde la separación lineal no es posible; esto se considera más flexible que los núcleos lineales o polinomiales, ya que puede modelar muchos más sistemas con su espacio de funciones.

RESULTADOS

Las características del desplazamiento del CoP de cada grupo de estudio se resumen en la tabla 2, donde se muestra el valor medio bajo cada pie y en cada una de las dos posibles direcciones (medio-lateral ML y anteroposterior AP). En general, se observaron diferencias de grupo significativas ($p < 0,05$) en cada una de las medidas.

Tabla 2. Valores medios del desplazamiento del CoP

Variables	MLI (mm)	API (mm)	MLD (mm)	APD (mm)
Amputados	0,23	4,64	0,37	1,55
Controles	0,12	0,5	0,15	0,75

Nota: ML: medio-lateral; AP: anteroposterior; I: izquierdo; D: derecho.

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a los modelos de aprendizaje automático para el reconocimiento del comportamiento de estabilidad postural estática de los amputados transtibiales, en el subconjunto de entrenamiento la precisión media de todos los métodos de aprendizaje automático osciló entre el 68,8 % (clúster) y el 88,5 % (SVM); es de anotar que el árbol de decisión tiene un valor próximo de precisión cercano al dado por la SVM (figura 1). Al examinar el subconjunto con los datos de prueba la precisión se encontró entre 70 % (clúster) y 90,8 % (SVM). La sensibilidad estuvo por encima de 29 % (clúster) y por debajo de 71 % (SVM), esto en el conjunto de entrenamiento. Respecto a la especificidad, se estableció entre 78,7 % (clúster) y 92,8 % (SVM). La puntuación F1 tuvo como valor mínimo 0,41 en el clúster y valor máximo 0,79 en la SVM. En particular, dos métodos (árboles de decisión y SVM) lograron una precisión de clasificación alta y puntaje F1 mayor a 0,5 en los dos subconjuntos, mientras que el clúster y las reglas de decisión alcanzaron un valor alrededor de 0,4 en esta medida. En general, la SVM produce resultados comparativamente estables en los subconjuntos, con una alta precisión constante y puntuación F1. Sin embargo, todos los modelos pudieron realizar la clasificación a pesar de los límites difusos de los subconjuntos.

La clasificación de las variables de entrada influyentes en la estabilidad (tabla 1) se realizó de acuerdo con su desempeño discriminatorio; en la evaluación se empleó la teoría de la información de Shannon, para lo cual se calculó la cantidad de información transmitida por cada variable (ganancia) y la confianza, definida esta como el grado de seguridad de que la distribución multivariable de la variable representa el conjunto de entrada. El desempeño de clasificación se observa en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de las variables de entada

Variable	MLI	API	MLD	APD
Ganancia (%)	5,37	44,61	6,51	4,77
Confianza (%)	95,24	96,11	95,03	90,03

Fuente: elaboración propia.

El análisis de las características más influyentes reveló diferencias significativas entre grupos para todas las características. Las siguientes características discriminaron mejor entre los grupos: a) el

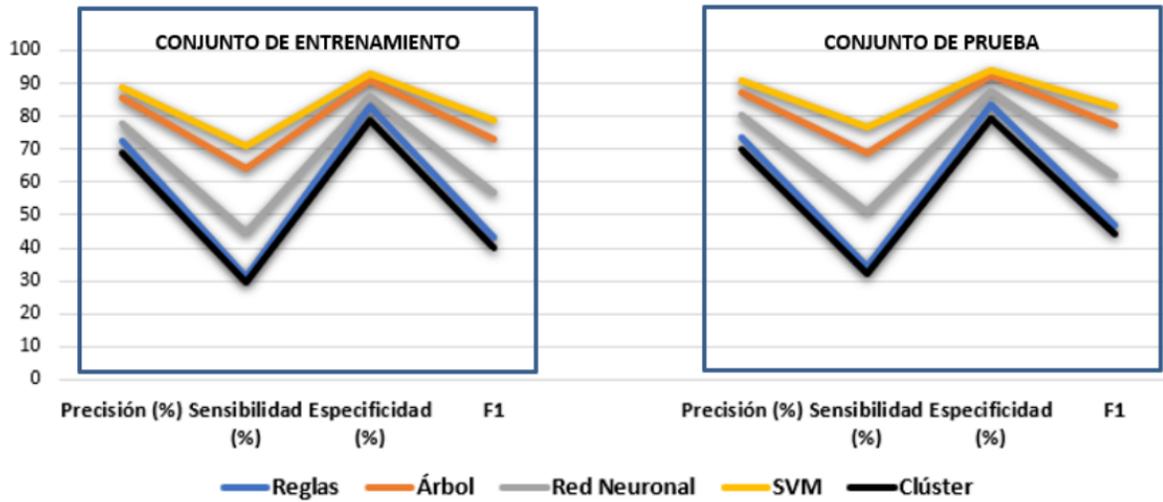


Figura 1. Medidas de rendimiento de los cinco modelos implementados
Fuente: elaboración propia.

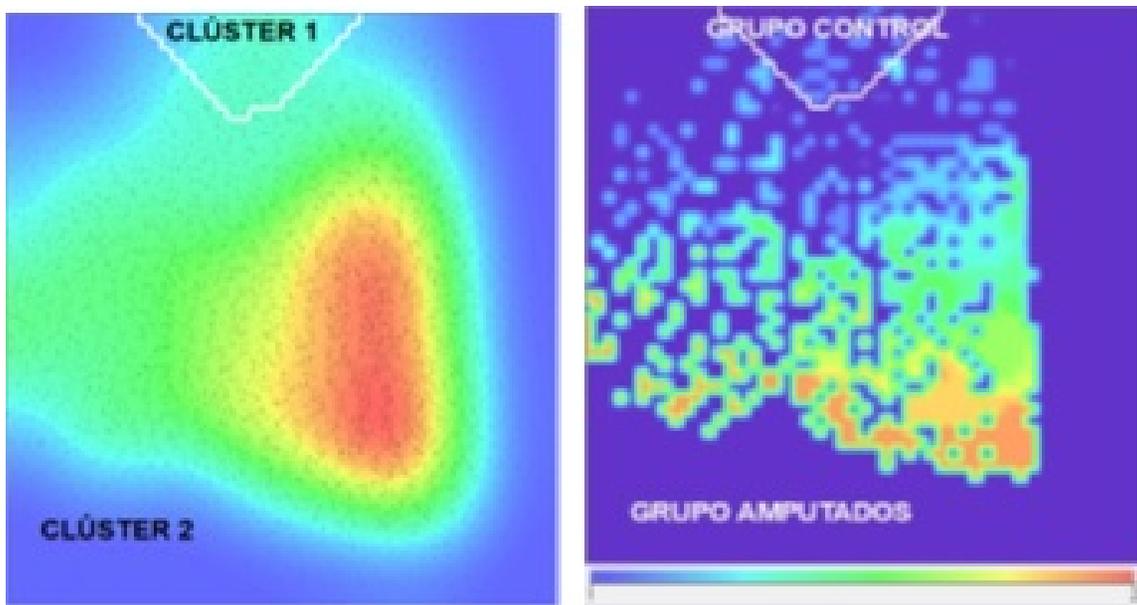


Figura 2. Distribución de características del desplazamiento del CoP para todos los sujetos de estudio proyectadas en el espacio 2D

Nota: se representa la similitud relativa entre datos por proximidad y no tienen unidades. La codificación revela una separación clara entre los dos grupos, amputados y control.

Fuente: elaboración propia.

desplazamiento del lado no amputado en dirección AP afecta directamente la estabilidad, además la variabilidad y el promedio de esta característica es alta en los amputados; b) en dirección medial-lateral, el lado de mayor incidencia es el amputado; c) la característica menos influyente es el desplazamiento anteroposterior en el lado amputado, se observa la rigidez de la articulación artificial del tobillo. La clasificación de la importancia de las características reveló parámetros clínicamente importantes con diferencias significativas entre grupos, pues se observó la alta contribución de la extremidad contralateral.

El cálculo de la reducción de dimensionalidad para la obtención de un mapa 2D se realizó en el *software Powerhouse™*. Este mapa de densidad da a conocer cómo se distribuye la información de las variables dentro de un espacio bidimensional, allí la separación entre el valor de cada medición y la similitud del contenido de la información son proporcionales. La representación de localización de datos con información similar se hace a través de puntos negros; cuando la información es bastante dispar entre dos datos, estos se sitúan en campos separados. Un campo toma el color rojo si presenta elevada concentración de datos, mientras que se torna azul con baja concentración. De esta forma se detectan los campos de más baja densidad para delimitar las agrupaciones (clústeres). En el presente caso de estudio se detectaron dos campos, identificando los dos grupos poblacionales a pesar de que los valores de los datos se superponen en los grupos (figura 2).

DISCUSIÓN

El desplazamiento del CoP permitió realizar la distinción entre los grupos, los amputados presentan un alto valor comparado con los no amputados, tal como lo reportan [Molero-Sánchez et al., 2015](#) y ([Kendell et al., 2010](#)). Los resultados de clasificación de los trastornos de la postura mediante el aprendizaje automático muestran una existencia clara de diferencias de la estabilidad estática postural entre amputados y controles, revalidando la afectación de la estabilidad postural como consecuencia del deterioro en alguno de los sistemas sensoriales como resultado de una enfermedad o trauma, estos hallazgos se han dado a conocer en estudios previos ([Claret et al., 2019](#), [Buldt et al., 2018](#)).

La contribución novedosa de esta investigación es identificar la participación de los distintos parámetros de CoP que son sensibles al deterioro del equilibrio en los amputados transtibiales unilaterales, aplicando métodos computacionales, ya que a través en gran cantidad de investigaciones se han mostrado las bondades del uso de tecnología en el ámbito médico ([Caicedo y Smida, 2016](#)). De hecho, el parámetro de amplitud de oscilación del CoP en el lado no amputado en dirección AP fue el predictor más fuerte para discriminar la estabilidad entre los grupos estudiados. Esta observación concuerda tanto con [Overgaard et al., 2018](#) como con [Claret et al., 2019](#), quienes demostraron que los amputados presentan un control postural deficiente, revelado en la estructura espacial y temporal de su dinámica de CoP durante la bipedestación estática, así mismo que la pierna no amputada de los amputados compensa las limitaciones mecánicas y la pérdida de somatosensibilidad en la prótesis.

Al respecto, [Rougier y Bergeau, 2009](#), cuando estudiaron el aporte de cada pierna a la estabilidad en amputados transtibiales y femorales, encontraron que ambas piernas participan igualmente en los desplazamientos de la dirección medio lateral; sin embargo, en la dirección anteroposterior, la pierna no amputada exhibe mayor excursión en el desplazamiento.

La exploración de la contribución de las variables arrojó que el lado amputado exhibe altos valores de entropía, lo que indica que este lado no es capaz de ejercer un control adecuado sobre la ubicación del CoP. Los valores reducidos de la extremidad contralateral sugieren el uso de este lado para control de la estabilidad. La contribución de las dos piernas para alcanzar la estabilidad estática se afecta por sucesos que alteran la lateralización conjunta, como es el caso de la amputación; eventualmente los amputados modifican las estrategias de contribución, de allí los altos valores de desplazamiento del CoP, para finalmente alcanzar el control sobre la estabilidad estática postural. Resultados similares se encontraron en otras investigaciones que usan otras técnicas de análisis ([Arifin et al., 2014](#), [Luengas y Toloza, 2019](#), [Rhea et al., 2015](#)).

La proyección no lineal de características en un mapa 2D permite evaluar la distribución de los patrones de balanceo posturográfico para 74 sujetos simultáneamente en un gráfico. El mapa 2D resultante revela grupos de trastornos de la postura que ocurren naturalmente en el presente estudio. Cabe señalar que el clúster logra este mapeo sin ninguna supervisión, es decir, sin conocimiento *a priori* de síntomas o trastornos específicos de los individuos evaluados. Las distribuciones de clases en el espacio, visualizadas en la figura 2, revelan dos grupos para los trastornos bien detectables. Las clases de alteraciones de la postura se agrupan a partir de la similitud estocástica de los patrones de balanceo, teniendo en cuenta la cantidad de información que posee cada dato medido, lo que confirma su alto poder discriminativo. El mapa reafirma que las personas con amputación tienen déficit de control postural ([Claret et al., 2019](#), [Buldt et al., 2018](#)).

Existe una creciente investigación sobre el uso de sistemas de apoyo al diagnóstico asistido por computadora en el contexto de escenarios clínicos complejos, ya que son de gran ayuda en situaciones donde la diferenciación de las etiologías de la falta de estabilidad plantea un gran desafío, como es el caso de los amputados. Los algoritmos de diagnóstico establecidos funcionan muy bien para discriminar alteraciones en la estabilidad, esto fue comprobado por [Kattah et al.](#) y [Newman-Toker et al.](#) (citados por ([Ahmadi et al., 2020](#))), y se reafirmó en esta investigación, puesto que la detección de amputación se logró con los cinco modelos desarrollados. En la separación de los dos grupos estudiados, la clasificación supervisada con la SVM arrojó una clasificación consistentemente buena, obteniendo sensibilidad y especificidad medias de 71,1 % y 92,8 %. Este algoritmo es el de mayor desempeño entre los estudiados, resultado comparable con las precisiones de clasificación publicadas previamente ([Abdul Razak et al., 2012](#), [Tucker et al., 2015](#), [Xu y Wunsch, 2010](#)). En el conjunto de datos que se utilizó en el presente estudio, la separación de grupos con clúster tuvo un rendimiento diagnóstico bajo; no obstante, su precisión de 68,8 % favoreció el reconocimiento de los grupos de estudio, al igual que [Baig et al., 2012](#) cuando emplearon *clustering* para discernir cuatro diferentes condiciones de estabilidad estática.

Una limitación de este estudio es la participación de solo amputados transtibiales como consecuencia de trauma por mina antipersonal, ya que se ha observado que la estabilidad se ve afectada por otras causas que también influyen en la amputación, por ejemplo, la diabetes mellitus (Tolozza y Zequera, 2017). La alta precisión de clasificación se explica, en parte, por las características de los grupos, la diferencia de edad intergrupala es baja, ya que los efectos del envejecimiento pueden provocar una disminución de la función biomecánica o sensorial y, como tal, se ha demostrado que afectan considerablemente la función postural estática (Drozdova-Statkevičienė *et al.*, 2018, Goble y Baweja, 2018, Hessert *et al.*, 2005). Por tanto, un grupo de control con un promedio de edad más alto probablemente conduciría a una ligera disminución en la precisión de la clasificación. Sin embargo, desde una perspectiva clínica, el principal objetivo de la clasificación es la diferenciación de los dos grupos, y es seguro asumir que las principales conclusiones de este estudio no se ven afectadas por la diferencia de edad. En futuros trabajos, las diferencias demográficas, como edad, género, causa de amputación y tiempo de amputado, podrían incorporarse a la clasificación para analizar su efecto en el diagnóstico diferencial entre los dos grupos.

La figura 2 mostró que, si bien los dos grupos son distinguibles, los valores de las mediciones se distribuyen escasamente y se entrelazan entre clases. Se presume que hay espacio para mejorar la clasificación, si se adicionan otras características ya sean temporales, tales como velocidad del CoP, valor RMS del CoP, área de la elipse o frecuenciales como la densidad espectral de potencia, por citar algunas. Es decir, existe la posibilidad de que la cantidad y el tipo de características influyan en la distinción óptima de un grupo específico, tal como las personas con amputación.

CONCLUSIONES

En el estudio actual, al comparar las puntuaciones de las cinco técnicas de aprendizaje automático en términos de precisión, todos los clasificadores de aprendizaje automático pudieron discriminar los dos grupos a partir de observar la estabilidad. Sin embargo, dos clasificadores de aprendizaje automático se desempeñaron de manera similar (árbol de decisiones y máquina de soporte vectorial), con una precisión por encima del 85 %, tanto en el conjunto de entrenamiento como en el de prueba. Luego, desde una perspectiva metodológica, los resultados proporcionan una estimación confiable de un rendimiento de clasificación prospectivo potencial para estudios de validación futuros, debido al uso de un esquema riguroso de validación cruzada de todos los modelos de aprendizaje automático. Más datos de entrenamiento en estudios pueden mejorar aún más los resultados, ya que el tamaño del conjunto de datos suele ser un factor limitante en los estudios de aprendizaje automático.

La posibilidad de incorporar un modelo de población semántico –como las reglas de decisión–, construido a partir de características relevantes para determinar amputación es atractiva desde un punto de vista clínico, ya que es de fácil interpretación. La eficacia de este enfoque en escenarios clínicos de la vida cotidiana debe validarse aún más en estudios futuros.

Teniendo en cuenta que los resultados obtenidos en la presente investigación provienen de un conjunto de datos amplio y una validación cruzada aleatoria, el presente estudio es una confirmación sólida de que las técnicas de aprendizaje automático se pueden utilizar para diferenciar patrones de balanceo postural típicos de varios trastornos.

Dada una adquisición estandarizada a largo plazo de bases de datos cuantitativas de pacientes, las técnicas modernas de aprendizaje automático y análisis de datos ayudan a visualizar, comprender y utilizar datos de alta dimensión entregados por sensores empleados en la rutina clínica, tendiendo hacia una evaluación computarizada y objetiva de los trastornos de la estabilidad estática postural.

REFERENCIAS

- [Abdul Razak *et al.*, 2012] Abdul Razak, A. H., Zayegh, A., Begg, R. K. y Wahab, Y. (2012). Foot plantar pressure measurement system: A review. *Sensors*, 12(7), <https://doi.org/10.3390/s1207098849884-9912> ↑Ver página 40
- [Ahmadi *et al.*, 2020] Ahmadi, S., Vivar, G., Navab, N., Möhwald, K., Maier, A., Hadzhikolev, H., Brandt, T., Grill, E., Dieterich, M., Jahn, K. y Zwergal, A. (2020). Modern machine-learning can support diagnostic differentiation. *Journal of Neurology*, 267(1), 143-152. <https://doi.org/10.1007/s00415-020-09931-z> ↑Ver página 40
- [Albertsen *et al.*, 2017] Albertsen, I. M., Ghédira, M., Gracies, J. M. y Hutin, É. (2017). Postural stability in young healthy subjects – Impact of reduced base of support, visual deprivation, dual tasking. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 33, 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2017.01.005> ↑Ver página 33
- [Amato *et al.*, 2012] Amato, F., López, A., Peña-Méndez, E. M., Vañhara, P., Hampl, A. y Havel, J. (2013). Artificial neural networks in medical diagnosis. *Journal of Applied Biomedicine*, 11, 47-58. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1214021X14600570> <https://doi.org/10.2478/v10136-012-0031-x> ↑Ver página 33
- [Arifin *et al.*, 2014] Arifin, N., Abu Osman, N. A., Ali, S., Gholizadeh, H. y Wan Abas, W. A. B. (2014). Postural stability characteristics of transtibial amputees wearing different prosthetic foot types when standing on various support surfaces. *Scientific World Journal*, 2014, 856279. <https://doi.org/10.1155/2014/856279> ↑Ver página 40
- [Arora *et al.*, 2014] Arora, S., Venkataraman, V., Donohue, S., Biglan, K. M., Dorsey, E. R. y Little, M. A. (2014). High accuracy discrimination of Parkinson's disease participants from healthy controls using smartphones. En *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing – Proceedings* (pp. 3641-3644). <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2014.6854280> ↑Ver página 33

- [Audiffren *et al.*, 2016] Audiffren, J., Bargiotas, I., Vayatis, N., Vidal, P. P. y Ricard, D. (2016). A non linear scoring approach for evaluating balance: Classification of elderly as fallers and non-fallers. *PLoS ONE*, 11(12), e0167456. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167456> ↑Ver página 32
- [Baig *et al.*, 2012] Baig, S., Dansereau, R. M., Chan, A. D. C., Remaud, A. y Bilodeau, M. (2012). Cluster analysis of center-of-pressure measures. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 1(1), 9-17. <https://doi.org/10.11159/ijecs.2012.002> ↑Ver página 33, 40
- [Buldt *et al.*, 2018] Buldt, A. K., Murley, G. S., Butterworth, P., Levinger, P., Menz, H. B. y Landorf, K. B. (2018). The relationship between foot posture and lower limb kinematics during walking: A systematic review. *Gait & Posture*, 62(3), 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.01.010> ↑Ver página 32, 34, 39, 40
- [Caicedo y Smida, 2016] Caicedo, C. H. y Smida, A. (2016). Informational intensity for longitudinality care in health systems. *Visión Electrónica*, 10(1), 83-95. <https://doi.org/10.14483/22484728.11612> ↑Ver página 39
- [Claret *et al.*, 2019] Claret, C. R., Herget, G. W., Kouba, L., Wiest, D., Adler, J., Von Tscherner, V., Stieglitz, T. y Pasluosta, C. (2019). Neuromuscular adaptations and sensorimotor integration following a unilateral transfemoral amputation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 16(1), 115. <https://doi.org/10.1186/s12984-019-0586-9> ↑Ver página 39, 40
- [Cordero-Civantos y Calle-Cabanillas, 2017] Cordero-Civantos, C. y Calle-Cabanillas, M. I. (2017). Primeros pasos en la posturografía dinámica computarizada. *Revista ORL*, 9(3), 227-237. <https://doi.org/10.14201/orl.17370> ↑Ver página 32
- [De la Hoz Manotas *et al.*, 2013] De la Hoz Manotas, A. K., Martínez-Palacio, U. J. y Mendoza-Palechor, F. E. (2013). Técnicas de ML en medicina cardiovascular. *Memorias*, 11(20), 41-46. <https://doi.org/10.16925/me.v11i20.498> ↑Ver página 35
- [De Vassimon-Barroso *et al.*, 2017] De Vassimon-Barroso, V., Catai, A. M., Buto, M. S. D. S., Porta, A. y Takahashi, A. C. D. M. (2017). Linear and nonlinear analysis of postural control in frailty syndrome. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, 21(3), 184-191. <https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2017.03.015> ↑Ver página 32
- [Drozdova-Statkevičienė *et al.*, 2018] Drozdova-Statkevičienė, M., Česnaitienė, V. J., Pukėnas, K., Levin, O. y Masiulis, N. (2018). Sway regularity and sway activity in older adults' upright stance are differentially affected by dual task. *Neuroscience Letters*, 666, 153-157. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2017.12.054> ↑Ver página 41

- [Funato *et al.*, 2016] Funato, T., Aoi, S., Tomita, N. y Tsuchiya, K. (2016). Smooth enlargement of human standing sway by instability due to weak reaction floor and noise. *Royal Society Open Science*, 3(1). <https://doi.org/10.1098/rsos.150570> ↑Ver página 32
- [Gholipour y Arjmand, 2016] Gholipour, A. y Arjmand, N. (2016). Artificial neural networks to predict 3D spinal posture in reaching and lifting activities: Applications in biomechanical models. *Journal of Biomechanics*, 49(13), 2946-2952. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.07.008> ↑Ver página 33
- [Giovanini *et al.*, 2018] Giovanini, L. H. F., Manffra, E. F. y Nievola, J. C. (2018). Discriminating postural control behaviors from posturography with statistical tests and machine learning models: Does time series length matter? En Y. Shi, Y. Tian, H. Fu, V. V. Krzhizhanovskaya, M. H. Lees, P. M. A. Sloot y J. Dongarra (eds.), *Computational Science – ICCS 2018. Lecture Notes in Computer Science (LNCS 10862)* (pp. 350-357). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93713-7_28 ↑Ver página 32
- [Giovanini *et al.*, 2017] Giovanini, L. H. F., Silva, S. M., Manffra, E. F. y Nievola, J. C. (2017). Sampling and digital filtering effects when recognizing postural control with statistical tools and the decision tree classifier. *Procedia Computer Science*, 108, 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.117> ↑Ver página 32
- [Goble y Baweja, 2018] Goble, D. J. y Baweja, H. S. (2018). Postural sway normative data across the adult lifespan: Results from 6280 individuals on the Balance Tracking System balance test. *Geriatrics and Gerontology International*, 18(8), 1225-1229. <https://doi.org/10.1111/ggi.13452> ↑Ver página 32, 41
- [Hahn *et al.*, 2005] Hahn, M. E., Farley, A. M., Lin, V. y Chou, L. (2005). Neural network estimation of balance control during locomotion. *Journal of Biomechanics*, 38(4), 717-724. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.05.012> ↑Ver página 32
- [Haid *et al.*, 2018] Haid, T. H., Doix, A. C. M., Nigg, B. M. y Federolf, P. A. (2018). Age effects in postural control analyzed via a principal component analysis of kinematic data and interpreted in relation to predictions of the optimal feedback control theory. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2018.00022> ↑Ver página 32
- [Hessert *et al.*, 2005] Hessert, M. J., Vyas, M., Leach, J., Hu, K., Lipsitz, L. A. y Novak, V. (2005). Foot pressure distribution during walking in young and old adults. *BMC Geriatrics*, 5, 8. <https://doi.org/10.1186/1471-2318-5-8> ↑Ver página 41
- [Kamali *et al.*, 2013] Kamali, M., Karimi, M. T., Eshraghi, A. y Omar, H. (2013). Influential factors in stability of lower-limb amputees. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 92(12), 1110-1118. <https://doi.org/10.1097/PHM.0b013e31829b4b7a> ↑Ver página 33

- [Kendell *et al.*, 2010] Kendell, C., Lemaire, E. D., Dudek, N. L. y Kofman, J. (2010). Indicators of dynamic stability in transtibial prosthesis users. *Gait & Posture*, 31(3), 375-379. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.01.003> ↑Ver página 39
- [Kolarova *et al.*, 2013] Kolarova, B., Janura, M., Svoboda, Z. y Elfmark, M. (2013). Limits of stability in persons with transtibial amputation with respect to prosthetic alignment alterations. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 94(11), 2234-2240. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2013.05.019> ↑Ver página 33
- [Krafczyk *et al.*, 2006] Krafczyk, S., Tietze, S., Swoboda, W., Valkovič, P. y Brandt, T. (2006). Artificial neural network: A new diagnostic posturographic tool for disorders of stance. *Clinical Neurophysiology*, 117(8), 1692-1698. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2006.04.022> ↑Ver página 34
- [Lamoth *et al.*, 2010] Lamoth, C. J. C., Ainsworth, E., Polomski, W. y Houdijk, H. (2010). Variability and stability analysis of walking of transfemoral amputees. *Medical Engineering and Physics*, 32(9), 1009-1014. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2010.07.001> ↑Ver página 33
- [Lau *et al.*, 2008] Lau, H. Y., Tong, K. Y. y Zhu, H. (2008). Support vector machine for classification of walking conditions using miniature kinematic sensors. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 46(6), 563-573. <https://doi.org/10.1007/s11517-008-0327-x> ↑Ver página 33
- [Luengas y Penagos, 2016] Luengas, L. A. y Penagos, A. (2016). Identificación del comportamiento de parámetros biomecánicos en la alineación estática de prótesis transtibiales utilizando SVM'S. *Tecnura*, 20, 31-42. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.SE1.a02> ↑Ver página 32
- [Luengas y Toloza, 2019] Luengas, L. A. y Toloza, D. C. (2019). *Análisis de estabilidad en amputados transtibiales unilaterales*. Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas. ↑Ver página 32, 40
- [Luengas y Toloza, 2020a] Luengas, L. A. y Toloza, D. C. (2020a). Frequency and spectral power density analysis of the stability of amputees subjects. *TecnoLógicas*, 23(48), 1-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.22430/22565337.1453> ↑Ver página 32, 35
- [Luengas y Toloza, 2020b] Luengas, L. A. y Toloza, D. C. (2020b). Application of wavelet transform to stability analysis in transtibial amputees. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 8(1), 214-225. <https://doi.org/https://doi.org/10.17081/invinno.8.1.3640> ↑Ver página 33
- [Moghadam *et al.*, 2011] Moghadam, M., Ashayeri, H., Salavati, M., Sarafzadeh, J., Taghipoor, K. D., Saeedi, A. y Salehi, R. (2011). Reliability of center of pressure measures of postural stability in healthy older adults: Effects of postural task difficulty and cognitive load. *Gait and Posture*, 33(4), 651-655. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.02.016> ↑Ver página 32

- [Molero-Sánchez *et al.*, 2015] Molero-Sánchez, A., Molina-Rueda, F., Alguacil-Diego, I. M., Cano-de la Cuerda, R. y Miangolarra-Page, J. C. (2015). Comparison of stability limits in men with traumatic transtibial amputation and a nonamputee control group. *PM and R*, 7(2), 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2014.08.953> ↑Ver página 33, 39
- [Muniz *et al.*, 2010] Muniz, A. M. S., Liu, H., Lyons, K. E., Pahwa, R., Liu, W., Nobre, F. F. y Nadal, J. (2010). Comparison among probabilistic neural network, support vector machine and logistic regression for evaluating the effect of subthalamic stimulation in Parkinson disease on ground reaction force during gait. *Journal of Biomechanics*, 43(4), 720-726. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.10.018> ↑Ver página 33
- [Overgaard *et al.*, 2018] Overgaard, M., Gehlert, T. F., Pedersen, L. K. y Nordbye-Nielsen, K. (2018). Objective assessment of postural control after lower-limb amputation: A pilot study. *Journal of Prosthetics and Orthotics*, 30(4), 236-241. <https://doi.org/10.1097/JPO.000000000000206> ↑Ver página 39
- [Peydro de Moya *et al.*, 2005] Peydro de Moya, M. F., Baydal, J. M. y Vivas, M. J. (2005). Evaluación y rehabilitación del equilibrio mediante posturografía. *Rehabilitación*, 39(6), 315-323. [https://doi.org/10.1016/S0048-7120\(05\)74365-6](https://doi.org/10.1016/S0048-7120(05)74365-6) ↑Ver página 32
- [Qiu y Xiong, 2015] Qiu, H. y Xiong, S. (2015). Center-of-pressure based postural sway measures: Reliability and ability to distinguish between age, fear of falling and fall history. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 47, 37-44. <https://doi.org/10.1016/J.ERGON.2015.02.004> ↑Ver página 32
- [Rhea *et al.*, 2014] Rhea, C. K., Kiefer, A. W., Haran, F. J., Glass, S. M. y Warren, W. H. (2014). A new measure of the CoP trajectory in postural sway: Dynamics of heading change. *Medical Engineering and Physics*, 36(11), 1473-1479. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2014.07.021> ↑Ver página 32
- [Rhea *et al.*, 2015] Rhea, C. K., Kiefer, A. W., Wright, W. G., Raisbeck, L. D. y Haran, F. J. (2015). Interpretation of postural control may change due to data processing techniques. *Gait and Posture*, 41(2), 731-735. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.01.008> ↑Ver página 32, 40
- [Roman-Liu, 2018] Roman-Liu, D. (2018). Age-related changes in the range and velocity of postural sway. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 77, 68-80. <https://doi.org/10.1016/j.archger.2018.04.007> ↑Ver página 32
- [Rosado Gómez y Verjel Ibáñez, 2015] Rosado Gómez, A. A. y Verjel Ibáñez, A. (2015). Minería de datos aplicada a la demanda del transporte aéreo en Ocaña, Norte de Santander. *Tecnura*, 19(45), 101-113. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a08> ↑Ver página 32

- [Rougier y Bergeau, 2009] Rougier, P. R. y Bergeau, J. (2009). Biomechanical analysis of postural control of persons with transtibial or transfemoral amputation. *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, 88(11), 896-903. <https://doi.org/10.1097/PHM.0b013e3181b331af> ↑Ver página 40
- [Sadeghisani et al., 2016] Sadeghisani, M., Karimi, M. T. y Kamali, M. (2016). Nonlinear analysis of postural sway in subjects with below knee amputation during opened and closed eye conditions. *Journal of Orthopaedics*, 13(3), 152-156. <https://doi.org/10.1016/j.jor.2016.03.009> ↑Ver página 33
- [Safi et al., 2017] Safi, K., Mohammed, S., Amirat, Y. y Khalil, M. (2017). Postural stability analysis: A review of techniques and methods for human stability assessment. *Fourth International Conference on Advances in Biomedical Engineering (ICABME)*, 978(1), 3-6. <https://doi.org/10.1109/ICABME.2017.8167565> ↑Ver página 32
- [Salarte y Castro, 2012] Salarte, G. y Castro, Y. (2012). Modelo híbrido para el diagnóstico de enfermedades cardiovasculares basado en inteligencia artificial. *Tecnura*, 16(33), 35-52. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257024374004> ↑Ver página 32
- [Şencan et al., 2017] Şencan, S., Ayaş, Ş. y Saraçgil Coşar, S. N. (2016). A study which investigates the relationship of age, trunk strength, and balance parameters with fall risk. *Turkish Journal of Geriatrics*, 19(3), 174-182. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84984846382&partnerID=40&md5=e6e6658f73f997f5bb34a463f46c017b> ↑Ver página 32
- [Shan et al., 2004] Shan, G., Wu, G. y Haugh, L. (2004). A method to determine the interdependent relationships between biomechanical variables in artificial neural network models: The case of lower extremity muscle activity and body sway. *Neurocomputing*, 61(1-4), 241-258. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2003.05.002> ↑Ver página 32
- [Shannon, 2001] Shannon, C. E. (2001). A mathematical theory of communication. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 5, 3-55. <https://doi.org/10.1145/584091.584093> ↑Ver página 36
- [Sun et al., 2019] Sun, R., Hsieh, K. L. y Sosnoff, J. J. (2019). Fall risk prediction in multiple sclerosis using postural sway measures: A machine learning approach. *Scientific Reports*, 9(1), 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52697-2> ↑Ver página 32
- [Toloza y Zequera, 2017] Toloza, D. y Zequera, M. (2017). Linear and non-linear methods for analysis center pressure and its application in diabetic peripheral neuropathy: A systematic review. *IFMBE Proceedings*, 60, 713-716. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4086-3_179 ↑Ver página 32, 41

- [Tucker *et al.*, 2015] Tucker, M. R., Olivier, J., Pagel, A., Bleuler, H., Bouri, M., Lambercy, O., Millán, J. del R., Riener, R., Vallery, H. y Gassert, R. (2015). Control strategies for active lower extremity prosthetics and orthotics: A review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 12, 1. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-12-1> ↑Ver página 40
- [Wu *et al.*, 2018] Wu, L. C., Kuo, C., Loza, J., Kurt, M., Laksari, K., Yanez, L. Z., Senif, D., Anderson, S. C., Miller, L. E., Urban, J. E., Stitzel, J. D. y Camarillo, D. B. (2018). Detection of American football head impacts using biomechanical features and support vector machine classification. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17864-3> ↑Ver página 35
- [Xu y Wunsch, 2010] Xu, R. y Wunsch, D. C. (2010). Clustering algorithms in biomedical research: A review. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 3, 120-154. <https://doi.org/10.1109/RBME.2010.2083647> ↑Ver página 40
- [Yamamoto *et al.*, 2015] Yamamoto, T., Smith, C. E., Suzuki, Y., Kiyono, K., Tanahashi, T., Morasso, P. y Nomura, T. (2015). Universal and individual characteristics of postural sway during quiet standing in healthy young adults. *Physiological Reports*, 3(3), 1-24. <https://doi.org/10.14814/phy2.12329> ↑Ver página 32



Multitemporal Analysis of Urban Expansion in the Municipality of Madrid, Cundinamarca, between 1977 and 2020

Análisis multitemporal de la expansión urbana en el municipio de Madrid, Cundinamarca, entre 1977 y 2020

María Fernanda Culma-Tamara ¹, César Augusto García-Ubaque ²

Fecha de Recepción: 01 de noviembre de 2021

Fecha de Aceptación: 20 de abril de 2022

Cómo citar: Culma-Tamara., M.F y García-Ubaque., C.A. (2022). Multitemporal Analysis of Urban Expansion in the Municipality of Madrid, Cundinamarca, between 1977 and 2020. *Tecnura*, 26(73), 49-66. <https://doi.org/10.14483/22487638.19385>

Abstract

Context: Given the increasing population concentration, both the proximity of the town of Madrid to the city of Bogotá and the growing metropolitan area around the latter have a significant influence on the increased urbanization and the change in land use in the town of Madrid, Cundinamarca.

Objective: The objective of this study was to carry out a multitemporal analysis of the change in coverage and land use caused by urban expansion in the municipality of Madrid between 1977 and 2020.

Methodology: Satellite images were observed through supervised classification, following the Corine Land Cover methodology, which was adapted for the Colombian context, and utilizing geographic information systems. Area variation analyses were performed for each classification in each of the evaluated years.

Results: The data obtained show that the forest cover area and seminatural zones have been reduced by 86 % in a period of 43 years, and that artificial territories have progressively become predominant in each of the years, even reaching a coverage greater than 50 % of the municipality area. The agricultural territories have maintained 66,95 % of the surface of the municipality, and they correspond the land use with the largest occupied area for the evaluated period, which shows the importance of the soil for the economic development of the population.

Conclusions: This situation shows that population growth and urban expansion cause variations in coverage and land uses. Their valuation is an aspect that must be considered when elaborating development plans for municipal entities.

Keywords: land cover and use, geographic information systems, urban expansion, multitemporal analysis

¹Civil engineer, MsC in Construction and Habitat. Professor at Universidad Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia.
Email: culmat.maria@uniagraria.edu.co

²PhD in Engineering. Full professor, Department of Technology, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

Email: cagarciau@udistrital.edu.co

Resumen

Contexto: Debido a la creciente concentración demográfica, tanto la proximidad de la localidad de Madrid a la ciudad de Bogotá como el crecimiento del área metropolitana en torno a esta última tienen una influencia significativa en el aumento de la urbanización y el cambio de uso del suelo en la localidad de Madrid, Cundinamarca.

Objetivo: El objetivo de este estudio fue realizar un análisis multitemporal del cambio de cobertura y uso del suelo causados por la expansión urbana en el municipio de Madrid, Cundinamarca, entre 1977 y 2020.

Metodología: Se observaron imágenes satelitales por medio de clasificación supervisada, siguiendo la metodología Corine Land Cover adaptada para el contexto colombiano y utilizando sistemas de información geográfica. Se realizaron análisis de variación de área para cada clasificación en cada uno de los años evaluados.

Resultados: Los datos obtenidos muestran que el área de cobertura de bosques y las áreas semi naturales se han reducido en un 86 % en un periodo de 43 años y que los territorios artificiales han predominado en cada uno de los años de manera progresiva, llegando incluso a una cobertura superior al 50 % del área del municipio. Los territorios agrícolas han mantenido un 66,95 % de la superficie del municipio, y estos corresponden al uso de la tierra con la mayor área de ocupación para el territorio evaluado, lo cual muestra la importancia del suelo para el desarrollo económico de la población.

Conclusiones: Esta situación evidencia que el crecimiento de la población y la expansión urbana ocasiona variaciones en las coberturas y usos del suelo. Su valorización es un aspecto a considerar cuando se elaboran planes de desarrollo para entidades municipales.

Palabras clave: cobertura y uso del suelo, sistemas de información geográfica, expansión urbana, análisis multitemporal

Table of Contents

	Page
Introduction	50
Methodology	51
results	52
Forests and seminatural areas	53
Agricultural territories	55
Artificial territories	56
NDVI index	58
NDBI Index	59
Conclusions	62
References	64

INTRODUCTION

As a consequence of increasing population concentration, both the proximity of the town of Madrid (Cundinamarca) to the city of Bogotá and the growing metropolitan area around the lat-

ter (Aponte-Rodríguez, 2011) have a significant influence on the increased urbanization and the change in land use of the town. This can be observed in the latest census data on population, construction, and dwelling, which was conducted by the National Planning Department (DNP, 2020). In addition, Madrid is perceived as a town with land that is still available for business and enterprise uses (CCB, 2016), and it contributes significantly to the gross income of the whole department of Cundinamarca in industrial sectors such as food production, plastics, and rubber products manufacturing, among others (Gobernación de Cundinamarca, 2015). It also has a useful location and road accessibility to the center and eastern regions of the country, and it is an extraction site for construction materials such as dressing, sand, and gravel (Contraloría de Cundinamarca, 2018). There is an additional benefit to the industrial use of the town: the presence of Colombian Air Force facilities, as well as the possible future development of a small airport, which is currently in design and diagnostic stages by the National Infrastructure Agency (ANI, 2017). In light of the above, analyzing variations in vegetation cover, land use, and urban growth is relevant to the planning and management of the town's resources.

In this research, Geographic Information Systems (GIS) were used to analyze, process, store, generate, and visualize geographically referenced data. This allowed integrating images and descriptive and spatial data from applied mathematical models (?) in order to analyze the changes in land use and vegetation cover between 1977 and 2020 in the municipality of Madrid, Cundinamarca, Colombia.

Moreover, vegetation and buildings normalized differential indices were used to complement the analysis by estimating artificial or in-development areas.

This type of analysis is a contribution to the municipality's planning, management, and development because it provides insight into the behavior of population, economic, and natural land protection aspects.

METHODOLOGY

This is a qualitative research on the influence that urban expansion has had on vegetation cover and land use over time in the municipality of Madrid, Cundinamarca. It is supported by a multitemporal analysis with satellite images from 1977, 1985, 1997, 2007, 2018, and 2020. These specific dates almost coincide with those of official population and dwelling census conducted by the National Statistics Administration Department (DANE) (Alcaldía de Bogotá, 2018).

Table 1 shows the data obtained from the United States Geological Service (USGS) via sensors Landsat 5 and Landsat 8 (Alonso, 2006).

Figure 1 shows the processing and treatment of satellite images using the Arc Gis (ESRI) tool in order to obtain input data for the multitemporal analysis.

Table 1. List of satellite images of Madrid, Cundinamarca

Sensor	Register date (Acquisition)	ID	Path/Row
Landsat 5	January 07, 1977	LM02_L1GS_008057_19770107_20180421_01_T2.	8/57
Landsat 5	March 22, 1985	LM05_L1TP_008057_19850322_20180406_01_T2.	8/57
Landsat 5	August 30, 1997	LT05_L1TP_008057_19970830_20161230_01_T1.	8/57
Landsat 5	September 27, 2007	LT05_L1TP_008057_20070927_20161111_01_T1.tar	8/57
Landsat 8	December 30, 2018	LC08_L1TP_008057_20181230_20190130_01_T1.tar	8/57
Landsat 8	March 22, 2020	LC08_L1TP_008057_20200322_20200326_01_T1.tar	8/57

Source: (Alonso, 2006)

In the image selection stage, the main criterion was a maximum cloudiness of 20 % in the area. This, to ensure that it could be used to observe and quantify the vegetation in the land (Ávila & Molina, 2018). Afterwards, an image quality enhancement by radiometric calibration and atmospheric correction was performed in order to prepare the images for band combination (Santana *et al.*, 2010), as well as to ensure that the subsequent supervised classification process would be optimal (Tibaquirá, 2016).

Supervised classification was carried out through the Corine Land Cover methodology, which was adapted for the Colombian context (IDEAM, 2010). The assigned categories were agricultural territories, artificial territories, clouds, water bodies, forests, and seminatural areas (Lamprea, 2017).

Finally, via spectral band combination of red and near infrared, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalized Difference Building Index (NDBI) were mapped (Ariza *et al.*, 2018) for each year under study, in order to verify (a) the quantity and particularity of the vegetation, (b) the modified areas and their changes over time, (c) anthropogenic modifications due to land use and cover, and (d) how the former's increase over time has been throughout the time interval used for the multitemporal analysis (Cruz-Flores *et al.*, 2020).

RESULTS

Once the base data had been collected and the treatment and classification of satellite images had been performed, the following quantification of areas of interest was obtained (Table 2). The final selected images had a cloudiness of less than 3 %.

Figure 2 shows the mapping of the area categories obtained during the image classification process.

Next, the most significant changes in cover and land use in Madrid for the time frame under study are presented.

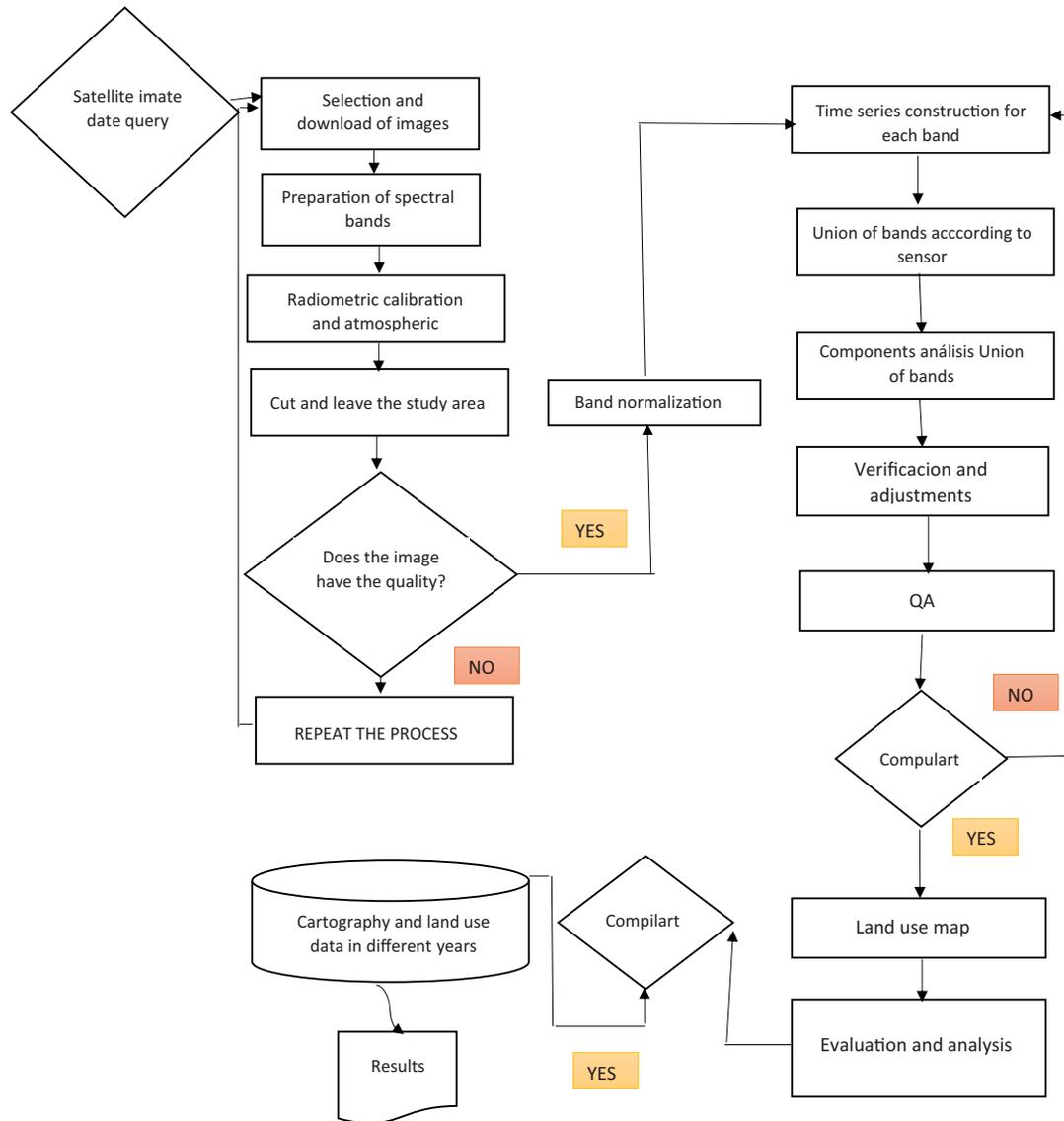


Figure 1. Satellite image processing diagram

Source: (Cabrera *et al.*, 2011).

Forests and seminatural areas

This type of cover showed a continuously decreasing behavior in the observed time frame. The area lost to the other types of covers from the first year of the observed interval to the last is 86 %. This, despite the 2012 modification to the municipality’s Basic Land Use Plan, in which the conformation of protected areas around native forests was encouraged (Concejo Municipal Madrid-Cundinamarca, 2012). The decreasing tendency of total forests and seminatural areas is shown in Figure 3. The total area for this type of cover in 2020 was only 5,71 km².

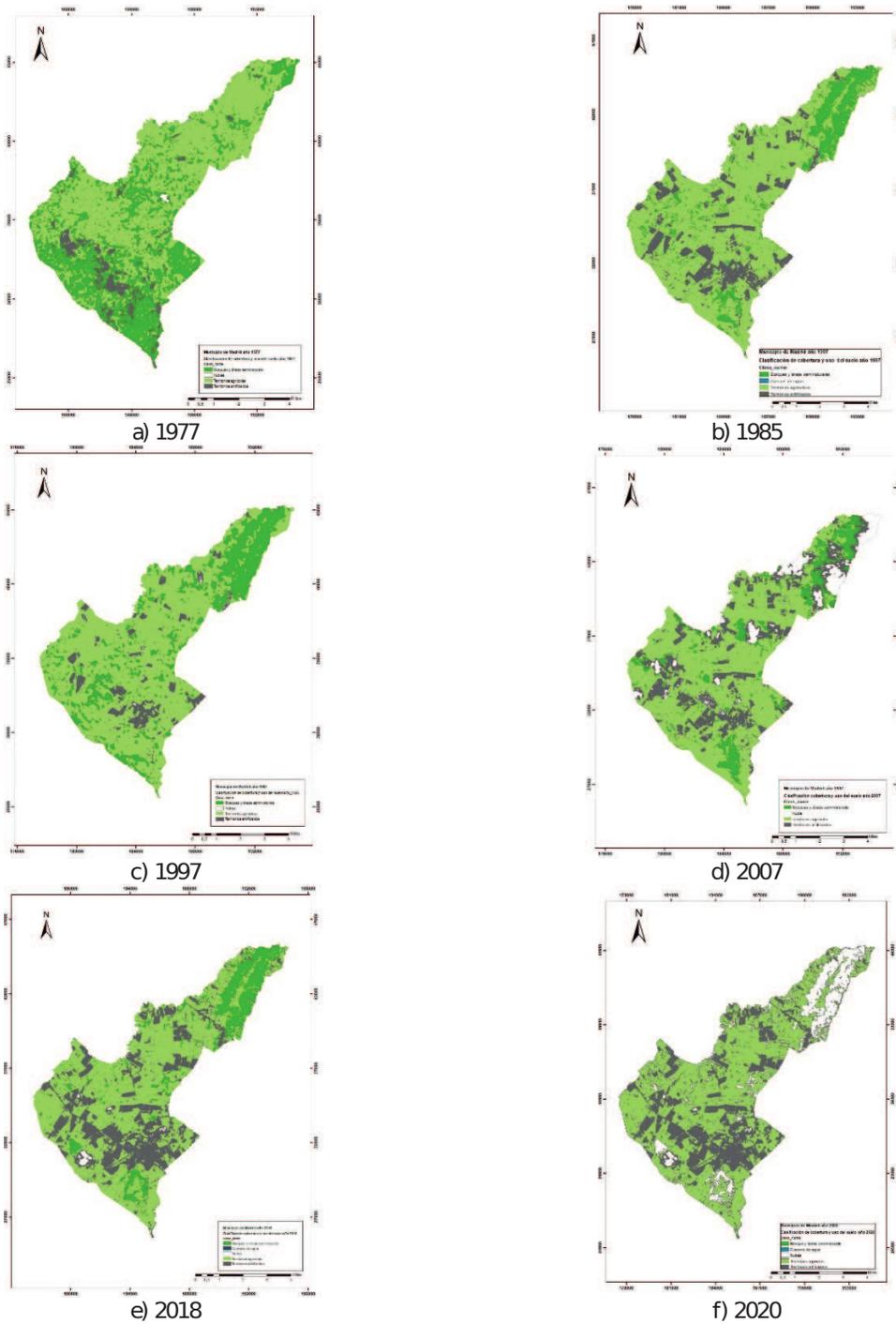


Figure 2. Mapping of the multitemporal analysis of land use in the municipality of Madrid, Cundinamarca, from 1977 to 2020

Source: Authors.

Table 2. Multitemporal analysis of cover and land use in Madrid, Cundinamarca

Year	1977		1985		1997		2007		2018		2020	
	%	km ²										
Forests and seminatural area	34,7	41,5	21,8	26,1	13,2	15,8	13,2	15,8	12,9	15,4	4,8	5,7
Clouds	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,8	1,0	2,4	2,9
Water bodies	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2
Agricultural territories	60,3	72,1	71,9	86,0	73,5	87,7	73,5	87,7	64,4	77,0	58,3	69,7
Artificial territories	4,8	5,8	6,1	7,3	13,3	16,0	13,3	16,0	21,8	26,2	34,3	41,1
Total	100	119,6	100	119,6	100	119,6	100	119,6	100	119,6	100	119,6

Source: Authors.

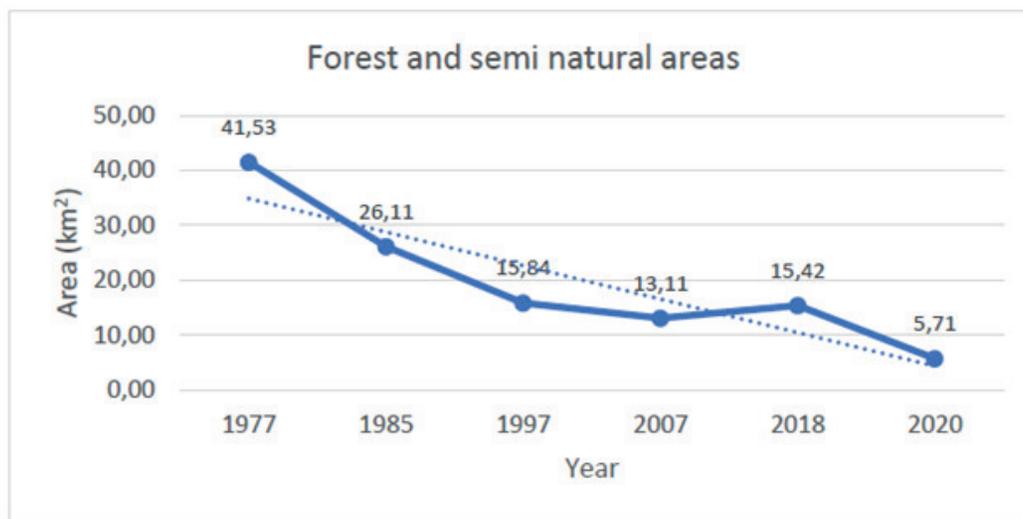


Figure 3. Analysis of forest and seminatural areas

Source: Authors.

Agricultural territories

This type of cover represents the predominant economic land use in the municipality (CCB, 2016). In the observed years, it maintained an average of 70 % of the town's total area, as can be seen in Figure 4. There is a slight 10 % decrease in the last time interval (between 2018 and 2020), but it is still the most significant land use in the town.

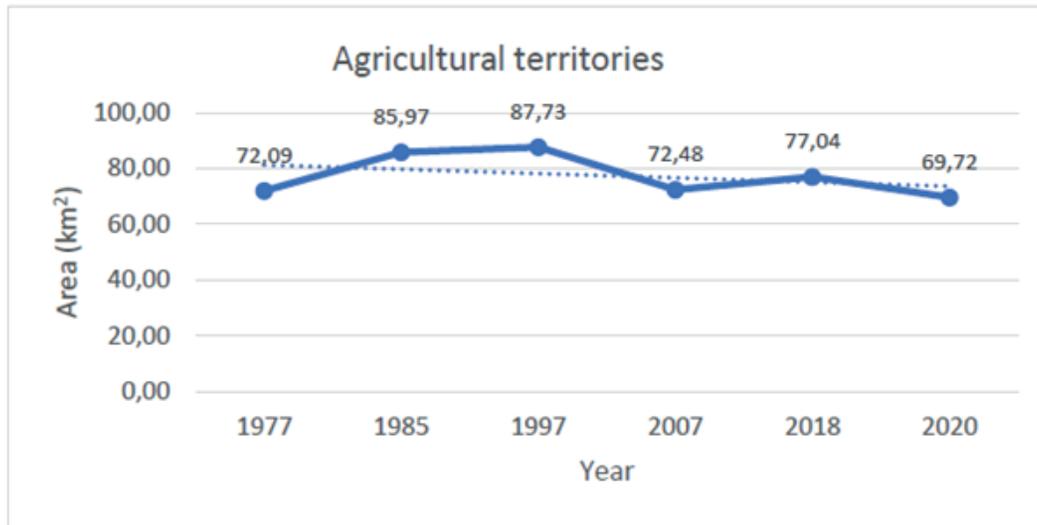


Figure 4. Analysis of agricultural area cover

Source: Authors.

Artificial territories

As it is shown in Figure 5, the total artificial cover area increased in the town. This type of cover results from the urban and industrial use of land, including mining and extraction, debris dump yards, and artificial non-agricultural greenery. This increase was steady during the observed time frame. For 2020, the total area covered by artificial territory was 41,08 km², which evidences an urban expansion in the municipality.

The expansion of artificial territories coincides with the observed loss of land of other types of cover, especially forests and seminatural areas, as can be seen in Figure 2. This is validated by comparing the cover and land use overlap between the first and the last year of the studied time frame.

Additionally, according to projections by the Madrid Town Hall ([Alcaldía de Madrid, 2019](#)), the need to supply the dwelling and infrastructure demand will cause the artificial cover to increase even more in the near future.

Next, the behaviors of the area count for the three types of cover and land use from 1977 to 2020 are presented side by side as evidence for the previous observations.

The change in cover and land use is analyzed according to the maps obtained by means of a transition matrix (Table 3) ([Humacata & Buzai, 2018](#)).

The agricultural territory was found to have an unchanged area of 43,13 km², which is 36,1 % of the total area of the town, followed by artificial territory, with 3,12 km² (2,6 % of the total area).

It is evident that the most frequent changes in land use were (a) from forest and seminatural areas to agricultural territory, and (b) from the agricultural to artificial territory. This could have been

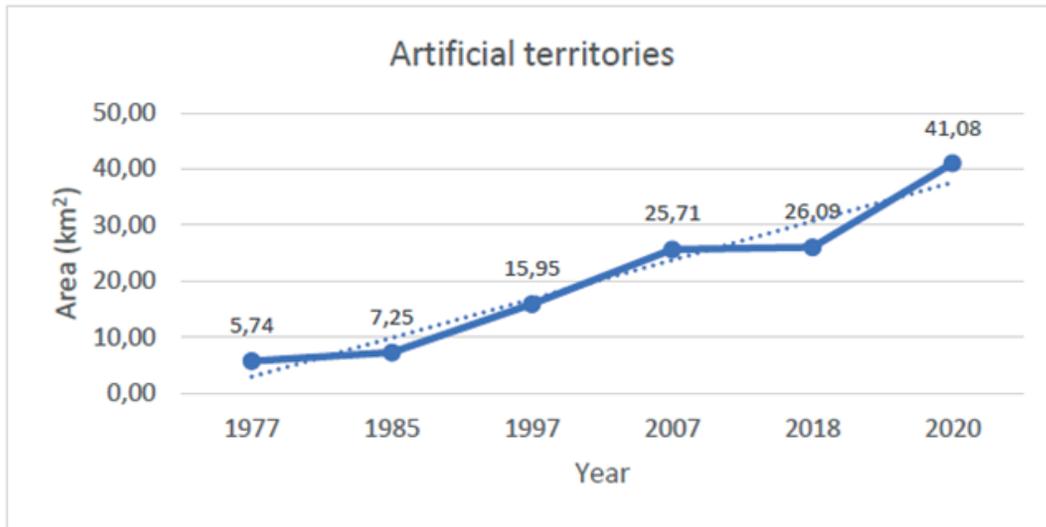


Figure 5. Analysis of artificial territories

Source: Authors.

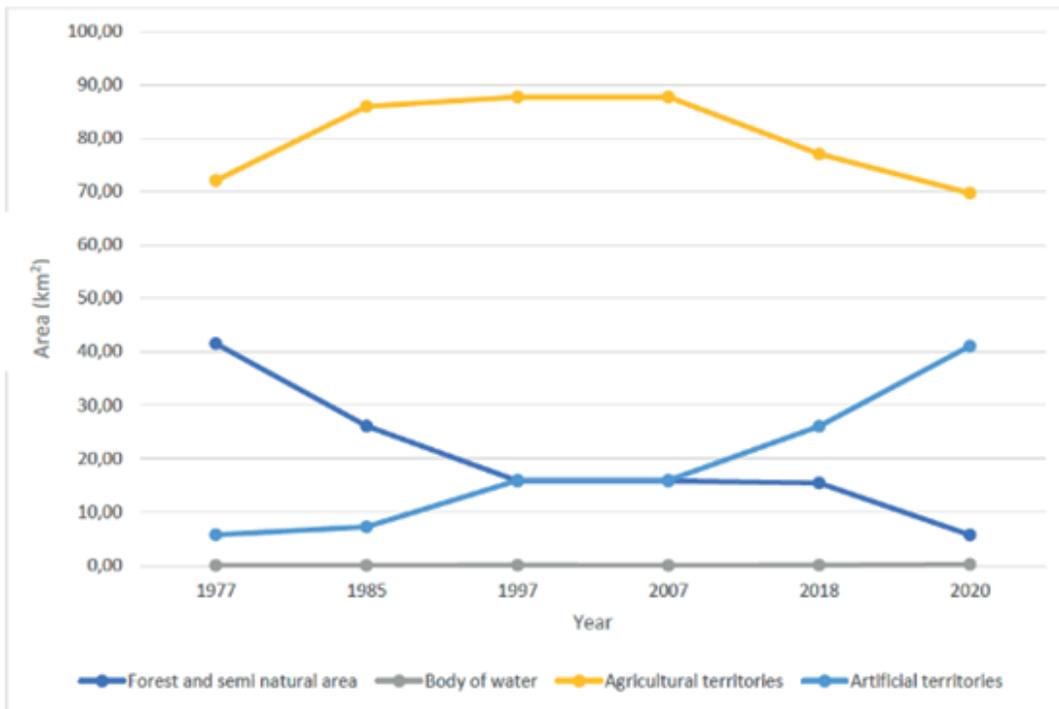


Figure 6. Behavior of types of cover and land uses in Madrid across the observed time frame

Source: Authors.

Table 3. Transition matrix for Madrid (1977 and 2020)

		2020				
		Agricultural territories	Artificial territories	Forests and seminatural areas	Water bodies	Clouds
1977	Transition matrix for cover and land use change	1	2	3	4	5
	Agricultural territories	10	11	12	13	14
	Artificial territories	20	21	22	23	24
	Forests and seminatural areas	30	31	32	33	34
	Water bodies	40	41	42	43	44
	Clouds	50	51	52	53	54

Source: Authors.

triggered by the population increase evidenced in the census data (an increase of approximately 112.307 inhabitants) (Oltra-Carrió *et al.*, 2010).

There was a noticeable reduction in the forest area (39,68 km² of the total area lost), a clear increase in artificial territory, and a location exchange between the latter and agricultural territories. This can be observed in Figures 7 and 8.

Next, by overlapping the maps obtained for 1977 and 2020, it was observed that a total area of 72,16 km² in the town changed cover and land use, i.e., 60 % of the total area of the municipality (Figure 8). Significant changes, as mentioned above, were seen in forest and agricultural cover, followed by more urban use.

NDVI index

This index represents the quantity, quality, and development of vegetation (Meneses-Tovar, 2011). The following classification and intervals were used: inanimate (-1 to 0), sick (0 to 0,33), moderately healthy (0,34 to 0,66), and very healthy (0,66 to 1) (Muñoz-Aguayo, 2013).

The areas shown in Table 4 were calculated.

Figure 9 shows the vegetation type variation for the observed time frame. There is an evident increase in the area occupied by -1 to 0,33 vegetation, which may be a consequence of the increased urban use of land.

There is a noticeable agricultural land use for flower cultivation and cattle raising in the municipality.

Figure 10 shows the annual behavior of the municipality's NDVI Index for the observed time frame.

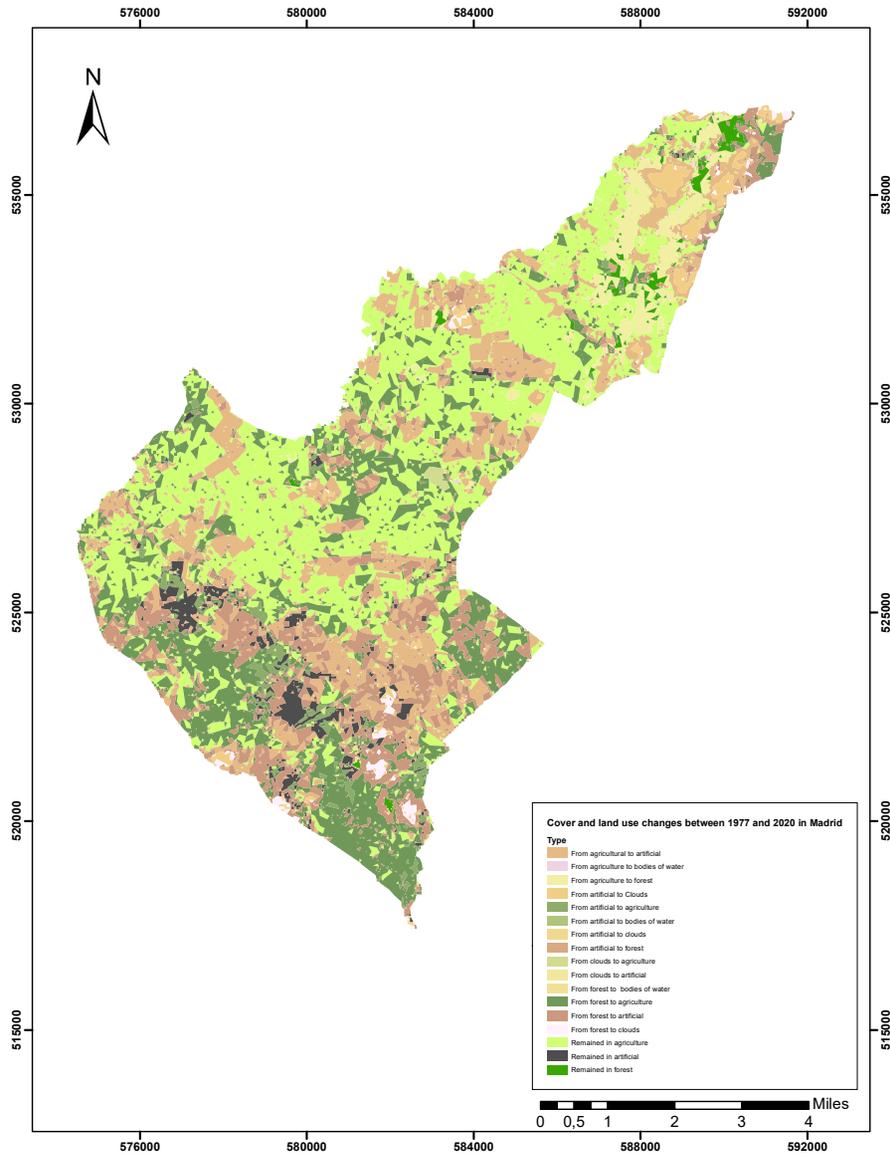


Figure 7. Cover and land use changes between 1977 and 2020 in Madrid

Source: Authors.

NDBI Index

This index allows discriminating between areas with building surfaces, in-development areas, and areas naturalized with vegetation (Totolhua-Ramírez, 2018). The following classification and intervals were used: vegetation zone (-1 to 0), crop growing (0 to 0,33), semihard zone or urban development zone (0,34 to 0,66), and anthropic infrastructure (0,66 to 1). Table 5 shows the calculated areas.

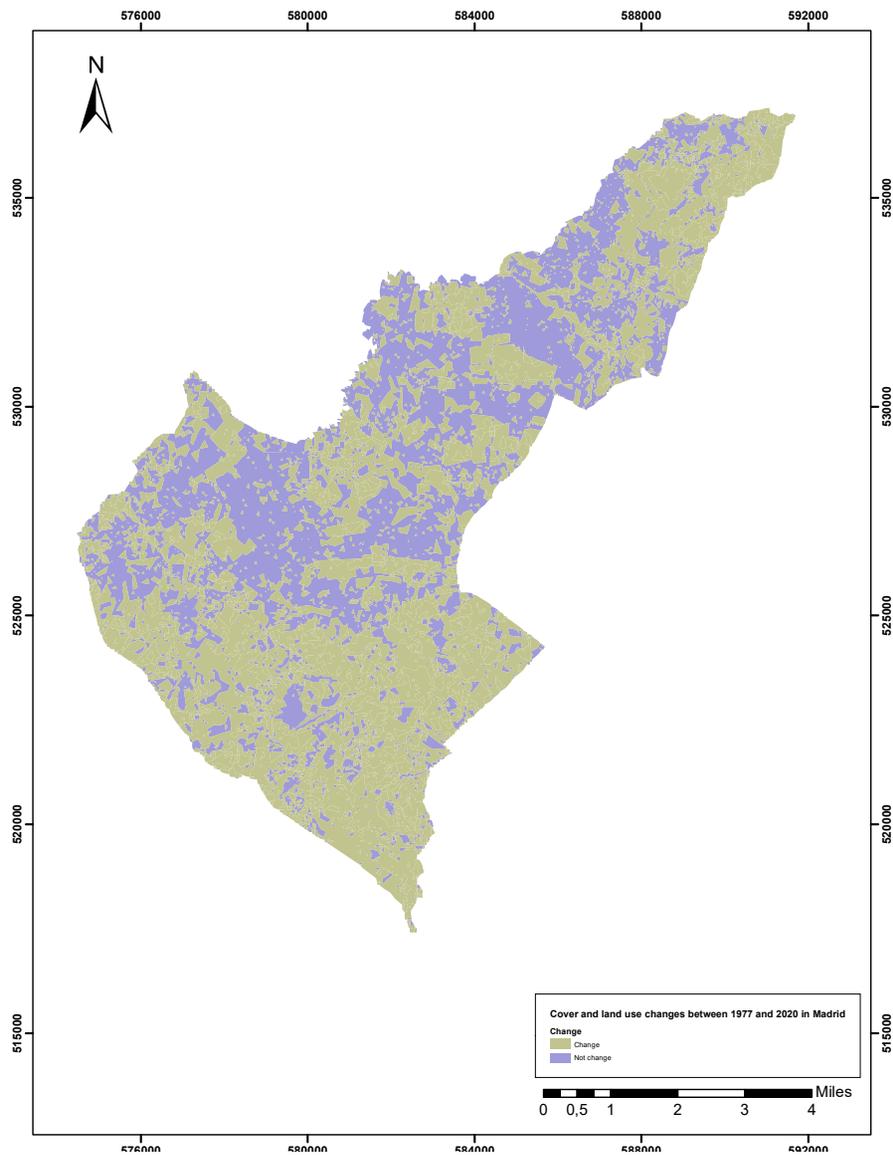


Figure 8. Cover and land use areas between 1977 and 2020, in Madrid, with and without changes

Source: Authors.

As shown in Figure 11, anthropogenic infrastructure and semihard zones increased in the observed years, which is in line with the analysis of cover and land use change.

Areas belonging to the crop growing category remained stable within the time frame, averaging 40 km², which could be also concluded by means of the NDVI index analysis.

Next, the annual behavior of the NDBI index for the municipality is presented.

Table 4. Multitemporal NVDI index for Madrid, Cundinamarca

Year/ Classification		1977	1985	1997	2007	2018	2020
		Area (km ²)					
1	Inanimate	0,20	11,0	12,30	8,83	19,58	19,70
2	Sick	3,71	33,1	35,66	37,04	34,00	40,27
3	Moderately healthy	81,81	49,7	47,22	43,43	37,00	40,20
4	Very healthy	33,86	25,7	24,39	30,27	29,00	19,41
Total		119,58	119,58	119,58	119,58	119,58	119,58

Source: Authors.

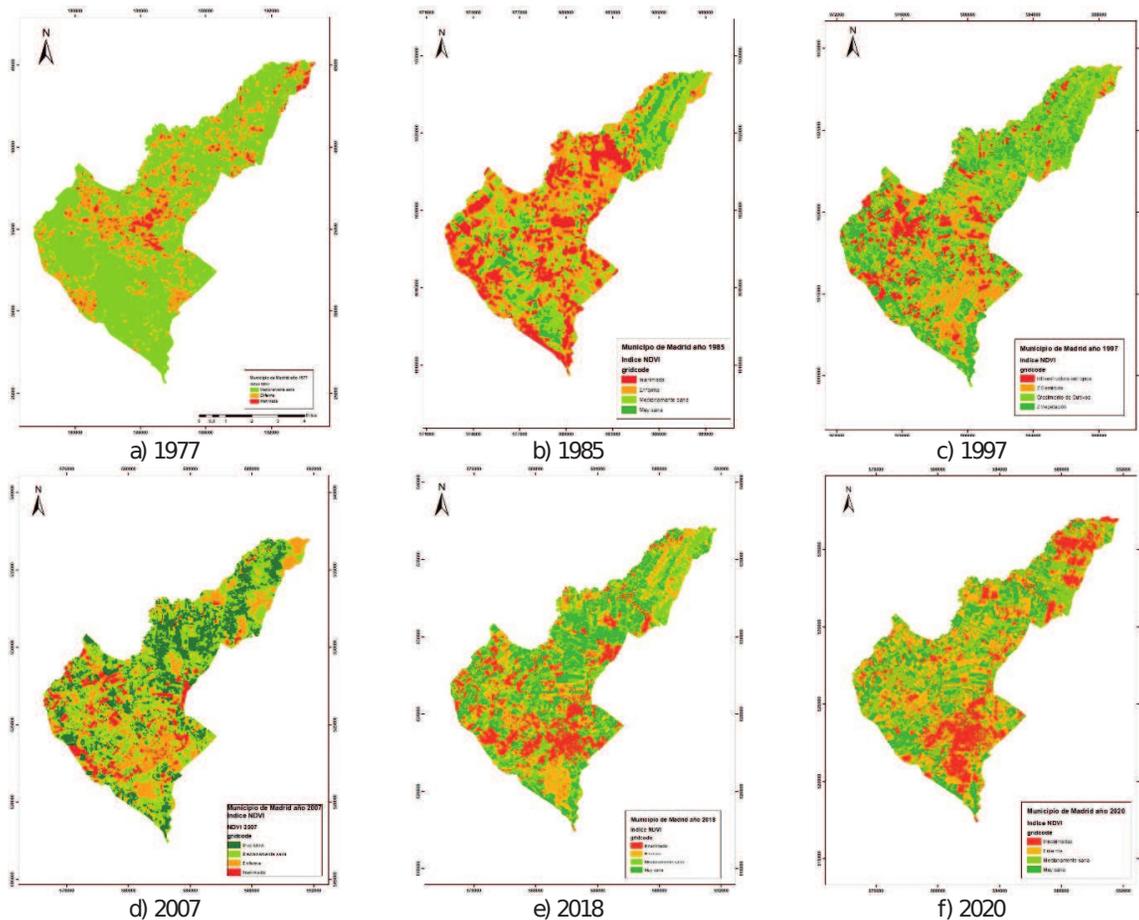


Figure 9. Multitemporal NVDI index for Madrid, Cundinamarca

Source: Authors.

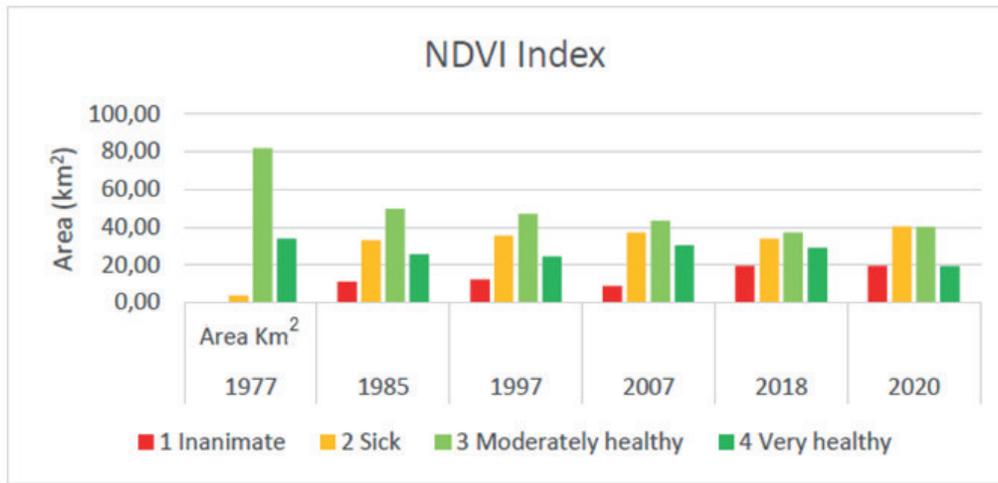


Figure 10. Annual behavior of the NDVI Index

Source: Authors.

Table 5. Multitemporal NDBI Index for Madrid, Cundinamarca

Year/Classification		1977	1985	1997	2007	2018	2020
		Area (Km ²)					
1	Vegetation zone	0,08	25,9	12,30	30,27	29,00	19,41
2	Crop growing	82,02	49,5	35,66	43,43	37,00	40,20
3	Semihard and urban development zone	33,82	33,1	47,22	37,04	34,00	40,27
4	Anthropic infrastructure	3,66	11,0	24,39	8,83	19,58	19,70
	Total	119,58	119,58	119,58	119,58	119,58	119,58

CONCLUSIONS

A significant decrease in forests and seminatural cover areas in the municipality of Madrid within the evaluated time frame was evidenced. Simultaneously, an increase in artificial territory was observed. Both observations coincide with a population increase, which was recorded during the census conducted by DANE. Urban expansion can also be located predominantly in the center and the southeast of the town due to their ease of access to the Sabana Road System.

Agricultural territory maintained an average of 66,95% of the town's total area, which makes it the most widespread land use in Madrid. This evidences its economic importance to the town. Moreover, as shown in the NDVI analysis, crop growing remained steady in the observed time frame. However, based on the conducted multitemporal analysis, it was evident that, although the percen-

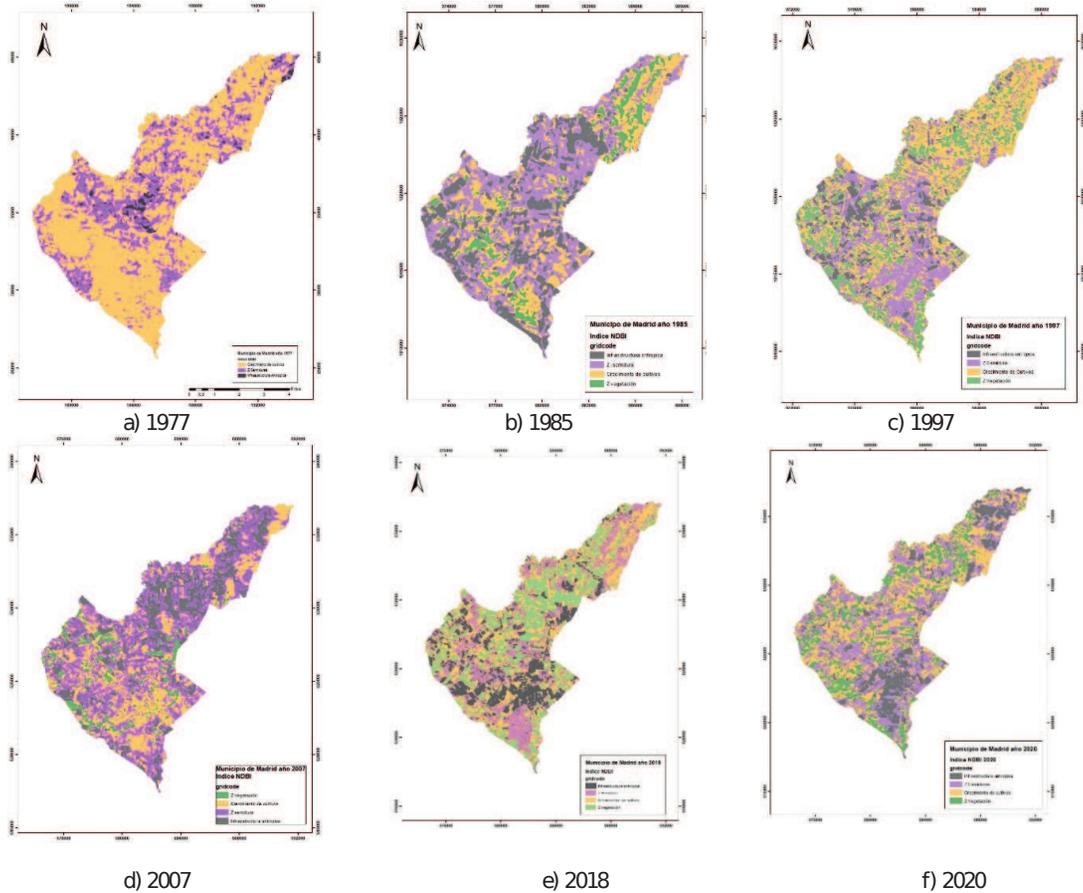


Figure 11. Multitemporal NDBI index for Madrid, Cundinamarca

Source: Authors.

tage of land used for agriculture remained steady, it moved from its initial location; artificial territory appeared in former agricultural areas, and agricultural territory appeared in former forests and seminatural areas.

Multitemporal analysis is a useful application of public-access satellite images, and it may assist local governments in conscious urban development planning and in the protection of natural areas.

The analysis of NDVI and NDBI indexes easily quantifies cover and land use behavior over time and is a key supplement to the supervised classification method. Additionally, a close relation is observed between the results obtained from both applied methods. The analysis of change in cover and land use by supervised classification and the band overlap in satellite images used to obtain the NDVI and NDBI indices were both evidence of the noticeable reduction in forests and seminatural cover areas in the town, as well as of the increase in urban land use.

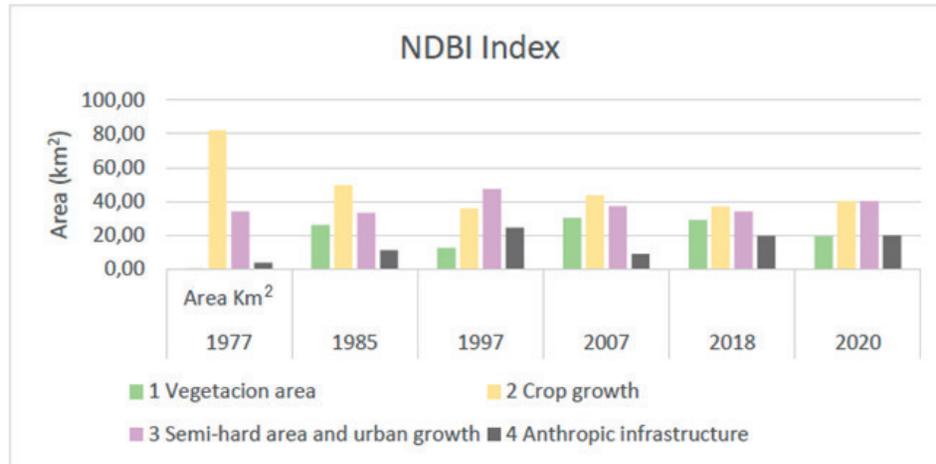


Figure 12. Annual behavior of the NDBI index

Source: Authors.

The implementation of more effective protection measures is recommended to preserve forests and seminatural cover areas, as they have lost an 86 % of their area between 1977 and 2020. Additionally, there is a need for strategies that appropriately regulate urban growth and ensure the protection of natural areas without compromising the town’s economic development.

REFERENCES

- [Alcaldía de Bogotá, 2018] Alcaldía de Bogotá (2018). *Análisis demográfico y proyecciones poblacionales de Bogotá*. Secretaría Distrital de Planeación. ↑Ver página 51
- [Alcaldía de Madrid, 2019] Alcaldía de Madrid (2019). *Documento técnico del plan básico de ordenamiento territorial*. https://madridcundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/madridcundinamarca/content/files/000697/34831_documento-resumen-de-la-formulacion-del-pbot_compressed.pdf ↑Ver página 56
- [Alonso, 2006] Alonso, F. (2006). *Sistemas de información geográfica*. <https://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/index.html> ↑Ver página 51, 52
- [ANI, 2017] Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) (2017). *Inician socializaciones del nuevo aeropuerto para la sabana de Bogotá*. <https://www.ani.gov.co/inician-socializaciones-del-nuevo-aeropuerto-para-la-sabana-de-bogota> ↑Ver página 51

- [Aponte-Rodríguez, 2011] Aponte-Rodríguez, W. A. (2011). Morfología urbana de Madrid, Cundinamarca. *Perspectiva Geográfica*, 16(1), 211-232. <https://doi.org/10.19053/01233769.1756> ↑Ver página 51
- [Ávila & Molina, 2018] Ávila, L., & Molina, J. (2018). *Análisis multitemporal del crecimiento urbano de Ibagué y su relación con el deterioro de las microcuencas urbanas: quebrada Las Panelas-La Balsa y quebrada Hato de la Virgen* [Specialization thesis, Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/15982> ↑Ver página 52
- [Ariza et al., 2018] Ariza, A., Roa-Melgarejo, O., Serrato, P., & León-Rincón, H. (2018). Uso de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización geomorfológica en zonas insulares del Caribe colombiano. *Perspectiva Geográfica*, 23(1), 105-122. <https://doi.org/10.19053/01233769.5863> ↑Ver página 52
- [Cabrera et al., 2011] Cabrera, E., Galindo, G., & Vargas, D. (2011). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia, nivel nacional escala gruesa y fina*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. ↑Ver página 53
- [CCB, 2016] Cámara de Comercio de Bogotá (CCB) (2016). *Caracterización económica y empresarial de diecinueve municipios de Cundinamarca*. CCB. ↑Ver página 51, 55
- [Contraloría de Cundinamarca, 2018] Contraloría de Cundinamarca (2018). *Diagnóstico minero*. Contraloría de Cundinamarca. ↑Ver página 51
- [Concejo Municipal Madrid-Cundinamarca, 2012] Concejo Municipal Madrid-Cundinamarca (2012). *Acuerdo 007. Modificación excepcional del Plan Básico de Ordenamiento Territorial del Municipio de Madrid Cundinamarca*. Concejo Municipal. ↑Ver página 53
- [Cruz-Flores et al., 2020] Cruz-Flores, D., Curbelo-Benítez, E., Ferrer-Sánchez, & Ávila, D. (2020). Variaciones espaciales y temporales en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Cuba. *Revista Ecosistemas*, 29(1), 1-12. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1885> ↑Ver página 52
- [DNP, 2020] National Planning Department (DNP) (2020). *Fichas y tableros. Madrid, Cundinamarca*. <https://terridata.dnp.gov.co/index-app.html#/perfiles/25430> ↑Ver página 51
- [Gobernación de Cundinamarca, 2015] Gobernación de Cundinamarca (2015). *Plan de desarrollo de Cundinamarca Unidos podemos más”, Anexo 3.3*. Secretaría de Planeación. ↑Ver página 51
- [Humacata & Buzai, 2018] Humacata, L., & Buzai, G. (2018, May 16-19). *Análisis espacial de los cambios de usos del suelo con Sistemas de Información Geográfica* [Conference presentation]. V Jornadas Nacionales de Investigación en Geografía Argentina - XI Jornadas de Investigación y Extensión del Centro de Investigaciones Geográficas, Tandil, Argentina. <https://host170.sedici.unlp.edu.ar/items/bba7ac54-dc01-4853-8a97-824fe4c1607f> ↑Ver página 56

- [IDEAM, 2010] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2010). *Le-yenda nacional de coberturas de la tierra: metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia escala 1:100.000*. IDEAM. ↑Ver página 52
- [Lamprea, 2017] Lamprea, F. (2017). *Zonificación de las coberturas de la tierra mediante la aplicación de herramientas SIG para la revisión y ajuste del P.O.T. en al marco del crecimiento urbano y la conurbación norte: caso municipio de Zipaquirá* [Undergraduate thesis, IGAC-Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/25625> ↑Ver página 52
- [Meneses-Tovar, 2011] Meneses-Tovar, C. L. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyuva: Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales*, 62(238), 39-46. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3925443>. ↑Ver página 58
- [Muñoz-Aguayo, 2013] Muñoz-Aguayo, P. (2013). *Apuntes de teledetección: índices de vegetación*. Centro de Información de Recursos Naturales. ↑Ver página 58
- [Oltra-Carrió *et al.*, 2010] Oltra-Carrió, R., Sobrino, J., Gutiérrez-Angonese, J., Gioia, A., Paolini, A. & Malizia, A. (2010). Estudio del crecimiento urbano, de la estructura de la vegetación y de la temperatura de la superficie del Gran San Miguel de Tucumán, Argentina. *Revista de Teledetección*, 34, 69-76. http://cursosihlla.bdh.org.ar/PDI2019/Bibliografia/2010_Oltra-Carri%C3%B3-Ts.pdf ↑Ver página 58
- [Santana *et al.*, 2010] Santana, L., Escobar, L., & Capote, P. (2010). Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. *Revista de Geografía Norte Grande*, 45, 77-95. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022010000100006> ↑Ver página 52
- [Tibaquirá, 2016] Tibaquirá, H. (2016). *Análisis multitemporal del crecimiento urbano de la zona de expansión para el periodo de 1987-2005 en el municipio de Ibagué, Tolima* [Specialization thesis, Universidad Militar Nueva Granada]. ↑Ver página 52
- [Totolhua-Ramírez, 2018] Totolhua-Ramírez, V. (2018). *Percepción remota básica con QGIS*. Comunidad QGIS México. ↑Ver página 59



Metodología para identificar zonas y estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayos en Barrancabermeja-Yondó

Methodology to identify areas and elevated structures with the greatest amount of lightning impacts in Barrancabermeja-Yondó

Brandon Steven Ardila Murillo ¹, Edison Andrés Soto Ríos ²

Fecha de Recepción: 01 de marzo de 2021

Fecha de Aceptación: 20 de abril de 2022

Cómo citar: Ardila-Murillo ., B.E. y Soto- Ríos ., E.A. (2022). Medición de parámetros en líneas de transmisión con sistemas embebidos. *Tecnura*, 26(73), 67-85. <https://doi.org/10.14483/22487638.17679>

Resumen

Objetivo: Este trabajo presenta una metodología para determinar los sitios y las estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayo (*hotspots*) en Barrancabermeja y Yondó.

Metodología: Se parte de la división de la superficie de estos dos municipios en polígonos de 600 metros. De esta forma, a través de la información de actividad de rayos (impactos nube-tierra) proporcionada por la Red Colombiana de Detección Total de Rayos - LINET entre enero de 2016 y febrero de 2020, se determinó el número de impactos por polígono, lo que permitió identificar los *hotspots* en las zonas de estudio. Así mismo, se identificaron y localizaron estructuras elevadas como torres de transmisión, antenas de telecomunicaciones y edificaciones, y se estableció para cada una de ellas un radio de influencia de 300 m, teniendo en cuenta el error medio de localización de la Red LINET, de esta manera se determinaron las 20 estructuras con mayor número de impactos de rayo.

Resultados: Se encontraron los polígonos con mayor actividad de rayos, de los cuales 34 se ubican en Barrancabermeja y 235 en Yondó, lo que concuerda con mapas de *densidad de descargas a tierra* hechos en la zona en donde se presenta un aumento en la cantidad de descargas por kilómetro cuadrado por año en Yondó, en comparación con Barrancabermeja. Se localizaron 616 estructuras elevadas en los municipios de Barrancabermeja y Yondó de las cuales se escogieron las 20 con mayor cantidad de impactos de rayo que corresponden en un 50% a torres de transmisión, siendo la estructura de mayor número de impactos una torre de transmisión de 70 m de altura localizada en límites de los dos municipios de estudio con un total de 68 impactos.

Conclusiones: De las 27 estructuras elevadas encontradas en Yondó, solo 6 se ubican en algún *hotspot*, lo que muestra que en este municipio la presencia de alguna estructura elevada no garantiza un *hotspot* y que los sitios de mayor actividad de rayos no se ven influenciados por la presencia de estructuras elevadas. Ahora bien, para el caso de Barrancabermeja se

¹Ingeniero electricista. Estudiante de la Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Email: brandon2208141@correo.uis.edu.co

²Ingeniero electricista; magíster en Ingeniería Eléctrica, y doctor en Ingeniería – Línea Automática, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Profesor asociado e investigador en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Email: [easotor@uis.edu.co](mailto: easotor@uis.edu.co)

hallaron 10 estructuras elevadas en un *hotspot*, de las cuales 7 están en el casco urbano donde se encontraron 9 *hotspots*, de donde se infiere que, en este municipio, el urbanismo y la presencia de estructuras elevadas si aumentan la actividad de rayos.

Financiamiento: Universidad Industrial de Santander.

Palabras clave: descargas atmosféricas, densidad de descargas a tierra (DDT), nivel cerámico (NC), estructuras elevadas, *hotspots*, Red LINET.

Abstract

Objective: This paper presents a methodology to determine the zones and elevated structures with the highest number of lightning strikes (Hotspots) in Barrancabermeja and Yondó.

Methodology: It starts from the division of the surface of these two municipalities into polygons of 600 meters. In this way, using the information of lightning activity (cloud-ground impacts) provided by the Colombian Network for Total Lightning Detection LINET between January 2016 and February 2020, the number of impacts per polygon was determined, which made it possible to identify the hotspots in the study areas. Likewise, elevated structures such as transmission towers, telecommunications antennas and buildings were identified and located and a radius of influence of 300 meters was established for each one of them taking into account the mean error of location of the LINET network. In this way it was possible to determine the twenty structures with the highest number of lightning strikes.

Results: The polygons with the highest lightning activity were found, of which 34 are located in Barrancabermeja and 235 in Yondó, which is consistent with maps of Density of Discharges to land made in the area where there is an increase in the number of flashes per square kilometer per year in Yondó compared to Barrancabermeja. 616 elevated structures were located in the municipalities of Barrancabermeja and Yondó, of which the twenty with the highest number of lightning strikes were chosen, which correspond 50 % to transmission towers, the structure with the highest number of impacts being a transmission tower of 70 meters high located on the border of the two study municipalities with a total of 68 impacts.

Conclusions: Of the 27 elevated structures found in Yondó, only 6 are located in a hotspot, which shows that in this municipality the presence of an elevated structure does not guarantee a hotspot and that the sites with the highest lightning activity are not influenced by the presence of elevated structures. Now, in the case of Barrancabermeja, 10 elevated structures were found in one of the hotspots, of which 7 are located in the urban area where 9 hotspots were found, from which it is inferred that in this municipality the urban planning and the presence of elevated structures, indeed increases the lightning activity.

Funding: Universidad Industrial de Santander.

Keywords: lightning, ground flash density (GFD), ceraunic level, elevated structures, hotspots, LINET network.

Tabla de Contenidos

	Página
Introducción	69
Metodología	70
Base de datos: Red Colombiana de Detección Total de Rayos con tecnología LINET	70
Procesamiento de datos de la Red LINET	71

Estructuras elevadas, clasificación y radio de influencia	71
Localización de impactos y recuadros de 600 m de lado en los municipios a analizar	73
Determinación del total de impactos por cuadrícula y por estructura	73
Resultados	74
Estructuras elevadas	74
Hotspots	78
Conclusiones	82
Financiamiento	84
Referencias	84

INTRODUCCIÓN

Estudios demuestran que de los 500 *hotspots* o lugares de mayor actividad de rayos en el globo terrestre, 283 de ellos se ubican en África, 87 en Asia, 67 en Suramérica, 53 en Norteaérica y 10 en Oceanía. Sin embargo, el sitio con mayor tasa de densidad de rayos (FRD) se encuentra sobre el lago de Maracaibo, al norte de Venezuela, en donde se registran en total 233 descargas/km²/año (Albrecht *et al.*, 2016), seguido por el *hotspot* hallado en la cuenca del Congo con un total de 205 descargas/km²/año (Christian *et al.*, 2003). Siete de los 10 sitios de mayor actividad de rayos en Suramérica se encuentran en Colombia, ya que su territorio se ubica en la zona de convergencia intertropical, donde confluyen los vientos alisios del sureste y del noreste, para los cuales las tres cordilleras que atraviesan la superficie del país sirven como barrera natural (Albrecht *et al.*, 2016), lo que favorece la formación de tormentas eléctricas a altitudes entre 500 y 1500 m s. n. m., en donde se presentan los valores máximos de densidad de descargas a Tierra (DDT) (Aranguren *et al.*, 2017).

De esta manera, en la totalidad del territorio nacional se presentan alrededor de 8 millones de descargas atmosféricas nube-tierra al año (Torres, 2002). A pesar de que la densidad de descargas a Tierra varía de un año a otro, los lugares con alta actividad de rayos en Colombia se ubican siempre en regiones como el valle central del río Magdalena, el Catatumbo y el valle del río Cauca, en donde se registraron entre 1999 y 2013 valores máximos promedio de 34,6 descargas/km²/año (Herrera *et al.*, 2018).

Las descargas atmosféricas son uno de los fenómenos naturales de mayor impacto en la sociedad en general, dado que hacen vulnerables a sistemas de soporte y asistencia vital y edificaciones con gran afluencia de personas o que contengan equipos frágiles (Ibáñez Olaya *et al.*, 2005); ocasionan salidas de líneas de distribución y transmisión (Avendaño e Ibáñez, 2000); causan daños en sistemas eléctricos y generadores eólicos (Avendaño *et al.*, 2003), y problemas de compatibilidad electromagnética en los sistemas de comunicaciones y afectación directa a sistemas de aviación (Rakov y Uman, 2003). Con lo que se producen pérdidas económicas y de vidas humanas y se afectan los indicadores

de calidad de energía eléctrica como el SAIDI y el SAIFI. Por ello, el entendimiento de este fenómeno natural y su caracterización son de suma importancia para poder diseñar sistemas de protección más robustos, y elaborar planes encaminados a proteger vidas humanas y a mitigar daños materiales y pérdidas económicas (Del Río Trujillo, 2018).

Las estructuras elevadas tienen más probabilidad de ser impactadas por rayos que sus alrededores (Rachidi *et al.*, 2008), dado que responden con líderes ascendentes de captura a los líderes escalonados que descienden de la atmósfera (Rakov y Uman, 2003). Así mismo, mientras que en las tormentas de invierno en latitudes medias se observa claramente cómo las estructuras elevadas inician líderes ascendentes, formando puntos de muy alta actividad de rayos (Montanyà *et al.*, 2014, Mostajabi *et al.*, 2018, Candela Garolera *et al.*, 2015), las regiones tropicales como Colombia presentan DDT muy elevadas, por lo que es difícil que la actividad en un punto concreto, o sobre alguna estructura, pueda sobrepasar la media de la región y por tanto no resulta evidente la identificación de *hotspots* y tampoco la influencia de estructuras elevadas allí ubicadas en la cantidad de impactos de rayo. Hasta el momento, los sitios de alta actividad de rayos se han determinado con base en la ocurrencia espacial de descargas nube-tierra a través del parámetro de la DDT. La metodología planteada se basa en la ocurrencia temporal de descargas nube-tierra (CG, por su sigla en inglés); es decir, para que una región sea un *hotspot*, se debe repetir el número de rayos y conservarse en el tiempo, o lo que es igual, se debe presentar de manera recurrente.

En este trabajo se determinan los lugares y las estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayo en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, a partir de información proporcionada por la Red Colombiana de Detección Total de Rayos, con tecnología LINET y se estudia la influencia de estructuras elevadas como torres de transmisión, antenas de telecomunicaciones y edificaciones en la actividad de rayos en esta región. Luego, presenta la metodología usada para la determinación de *hotspots* y estructuras, los cuales se agrupan en la sección de resultados. Por último, a modo de conclusiones, se da el número de sitios de mayor actividad de rayos por municipio y la presencia de estructuras elevadas en cada uno de ellos. Se espera que los sitios en donde se ubica alguna estructura elevada correspondan a un *hotspot* o que, en general, tengan un número significativo de impactos de rayo.

METODOLOGÍA

Base de datos: Red Colombiana de Detección Total de Rayos con tecnología LINET

En 2011 entra en operación la red de localización y detección de rayos (LINET), propiedad de Keraunos S. A. S. Esta red opera en rangos de frecuencia VLF/LF y es un sistema *Total Lightning* que entrega parámetros para cada *stroke* como el tiempo de ocurrencia, latitud, longitud, amplitud de la corriente de retorno, polaridad, tipo de descarga y altura de emisión, usando técnicas de tiempo

de arriba (TOA, por su sigla en inglés) (Aranguren *et al.*, 2017). Para la obtención de estos datos, se ubicaron 19 sensores en lugares estratégicos del territorio nacional, como se muestra en la figura 1, donde la separación entre sensores varía entre 90 km y 140 km (Aranguren *et al.*, 2017).

Con esta distribución se logra una eficiencia en la detección de descargas nube-tierra del 99 % en zonas centrales del país; del 95 %, para regiones más alejadas como el Pacífico, la Caribe, la Orinoquía occidental y el bajo Cauca; del 90 %-80 %, para la Orinoquía oriental y el suroeste del país, y del 60 %, para la Amazonía. Para descargas intranube, estos valores de eficiencia disminuyen considerablemente y varían entre el 80 % y el 20 %.

Cuando ocurre una descarga eléctrica, cada estación registra la forma de onda del campo magnético y su estampa de tiempo. Los datos de la detección son enviados en tiempo real por cada estación a una Unidad de Procesamiento Central, en la cual se ejecuta el algoritmo de detección de rayos que realiza la identificación y determinación de los parámetros de la descarga. Cada estación de medida se conforma de una antena de campo magnético que opera en las frecuencias VLF/LF, una antena GPS y una unidad de procesamiento de señal (Aranguren *et al.*, 2017).

Procesamiento de datos de la Red LINET

La Red LINET cataloga las descargas nube-tierra como tipo 1, y las intranube como tipo 2. En este estudio solo se tuvieron en cuenta las descargas tipo 1 (*strokes*), lo que permite encontrar los sitios y estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayo. Teniendo en cuenta que hay zonas en el país en donde la amplitud mínima detectable de la corriente pico de descarga es de 10 kA (? Williams, 2001), no se consideraron los impactos con corrientes menores a este valor. Los datos procesados de la Red LINET se encuentran desde enero de 2016 hasta febrero de 2020.

Estructuras elevadas, clasificación y radio de influencia

Mediante *Google Earth* y *Google Street View* se encontraron las coordenadas geográficas de un total de 616 estructuras elevadas ubicadas en los municipios de Barrancabermeja y Yondó. La totalidad de estructuras halladas se dividió en cuatro grupos: torres de transmisión de más de 20 m, antenas de telecomunicaciones de más de 30 m, edificios de más de 10 pisos de altura y otras estructuras como tanques elevados y reflectores de estadio. Para cada estructura se establece un radio de influencia de 300 m, teniendo en cuenta el error medio de localización la Red LINET; entonces, si una descarga CG se ubica dentro de dicho radio, se considera que impactó la estructura. La totalidad de estructuras halladas se encuentran dentro de la zona de alta eficiencia en la detección de la red Lightning Mapping Array (LMA), instalada en Barrancabermeja en 2018 y que detecta fuentes de radio en VHF emitidas por líderes de rayo en sus procesos de ionización. De esta manera, es posible reconstruir la propagación espacial y temporal de descargas atmosféricas (Rison *et al.*, 1999) y establecer su interacción con alguna estructura elevada. La red está compuesta por 6 estaciones, 4 de ellas ubicadas

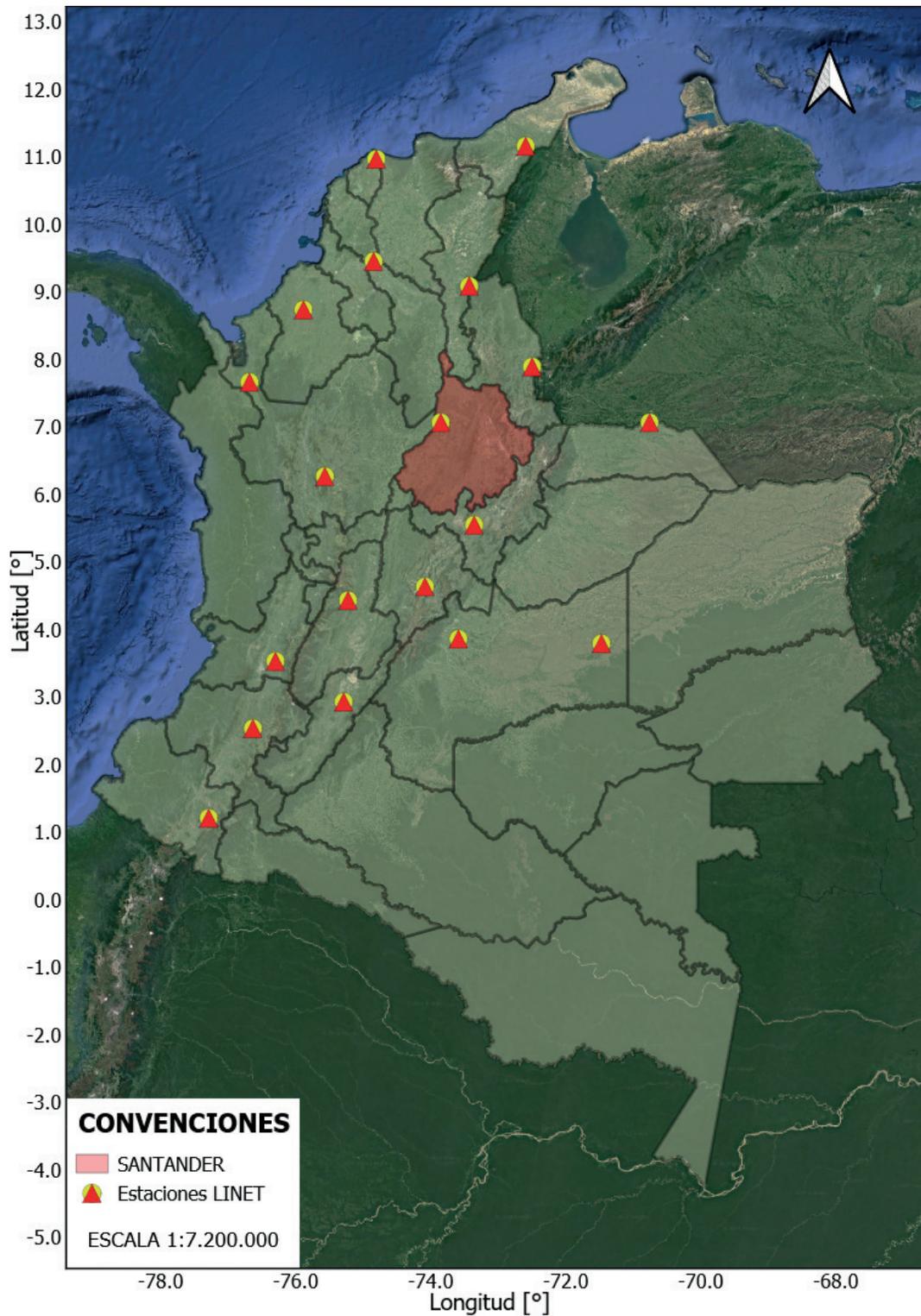


Figura 1. Ubicación geográfica de estructuras elevadas

Fuente: elaboración propia.

en campos petroleros de Ecopetrol, como Lisama, La Cira, Llanito y Casabe, y 2 en universidades como la Unipaz y la sede UIS Barrancabermeja, desde donde se establece la zona de alta eficiencia que corresponde a un radio de 45 km; en esta se pueden mapear las fuentes emitidas en los procesos de propagación de líderes de rayo y por tanto se minimiza el error en la localización de estas.

Localización de impactos y recuadros de 600 m de lado en los municipios a analizar

Para la caracterización de las zonas con mayor incidencia de rayos nube-tierra se ubicó cada *stroke* registrado por la Red LINET como un punto en el espacio, y se creó una cuadrícula de 600 m de lado sobre la superficie de los municipios de interés donde cada recuadro se aproxima a circunferencias con radio de 300 m que corresponde a la exactitud promedio de la Red LINET en la zona de estudio. Se evita el uso de circunferencias, ya que al ubicar círculos tangentes entre sí quedarían zonas por fuera de ellos, las cuales no se analizarían; en cambio, se traza una cuadrícula donde se circunscribe cada círculo y también se analiza la zona que queda por fuera de este. La figura 2 ilustra la metodología utilizada.

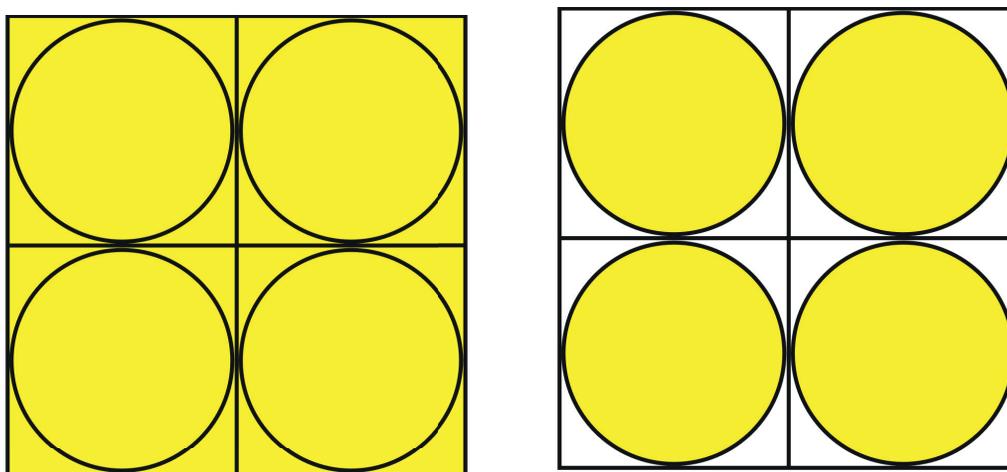


Figura 2. Área de análisis usando a) recuadros de 600 m de lado; b) círculos tangentes de 300 m de radio

Fuente: elaboración propia.

Además, la cuadrícula da resultados más exactos, dado que el área del recuadro es menor que la que se ha usado en la determinación de la DDT, lo que muestra con menor incertidumbre la influencia de la topografía del terreno en la actividad de rayos.

Determinación del total de impactos por cuadrícula y por estructura

Mediante la herramienta análisis de puntos del programa *QGIS*, que permite cuantificar la cantidad de puntos dentro de cada polígono rectangular, se determina el número de impactos por cuadrí-

cula, de esta manera se localizan mediante un centroide las zonas de mayor cantidad de impactos de rayo o *hotspots*.

En cuanto al análisis de estructuras elevadas, la información de la Red LINET se procesó diariamente para así determinar los días en que hubo una mayor interacción de descargas atmosféricas con estructuras elevadas. Para cada día se determinaron y cuantificaron las descargas que estuvieron dentro del radio de influencia de cada estructura y, finalmente, se escogieron las veinte estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos.

RESULTADOS

Estructuras elevadas

La figura 3 muestra la ubicación de las 616 estructuras elevadas encontradas en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, entre las que se encuentran 549 torres de transmisión con alturas entre 40

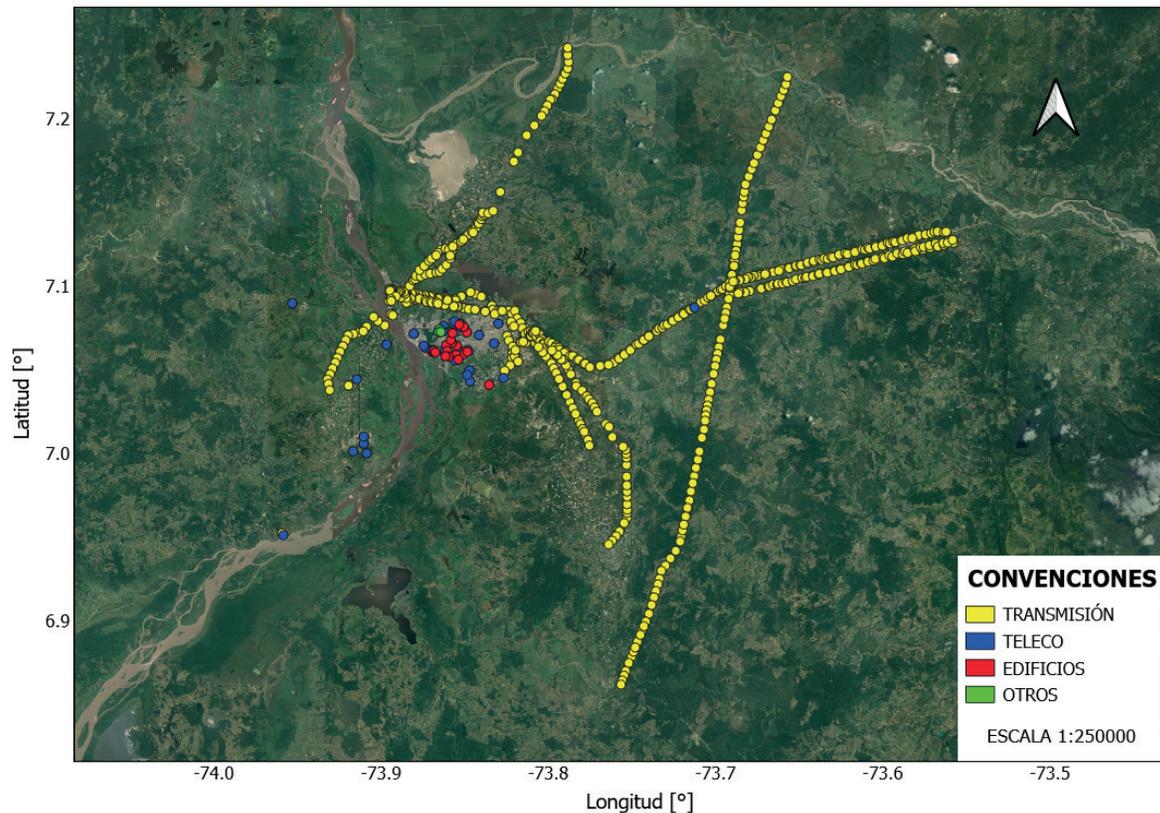


Figura 3. Ubicación geográfica de estructuras elevadas

Fuente: elaboración propia.

m y 70 m, 31 torres de telecomunicaciones con alturas que varían entre 60 m y 70 m, 22 edificaciones de más de 30 m y 4 estructuras de iluminación de estadios de 50 m.

La mayoría de las torres de transmisión forman parte del Sistema de Transmisión Nacional (STN) y corresponden a líneas de extra alta tensión como Barranca-Comuneros 230 kV, Comuneros-La Cira 230 kV, Comuneros-Merilétrica 230 kV y de alta tensión como Barranca Lizama 115 kV, Barranca-San Silvestre 115 kV, San Silvestre-Lizama 115 kV y Barranca-Puerto Wilches 115 kV. Así mismo, las antenas de telecomunicaciones se ubican en el casco urbano de Barrancabermeja y en el costado oriental de Yondó. La figura 4 ilustra la caracterización de estructuras elevadas según la cantidad de impactos de rayo en el periodo de tiempo de estudio.

De acuerdo con la figura 4, las estructuras que se ubican en el casco urbano de Barrancabermeja, como edificaciones y antenas de telecomunicaciones, y la mayoría de las de Yondó, presentan una alta interacción con descargas atmosféricas, siendo la estructura de mayor número de impactos una torre de transmisión de 70 m de altura localizada en Yondó al finalizar el puente que cruza el río Magdalena. Se observa un aumento en la actividad de rayos en límites de los dos municipios en mención, especialmente en las torres de transmisión de 230 kV ubicadas cerca de la central termoeléctrica Ter-

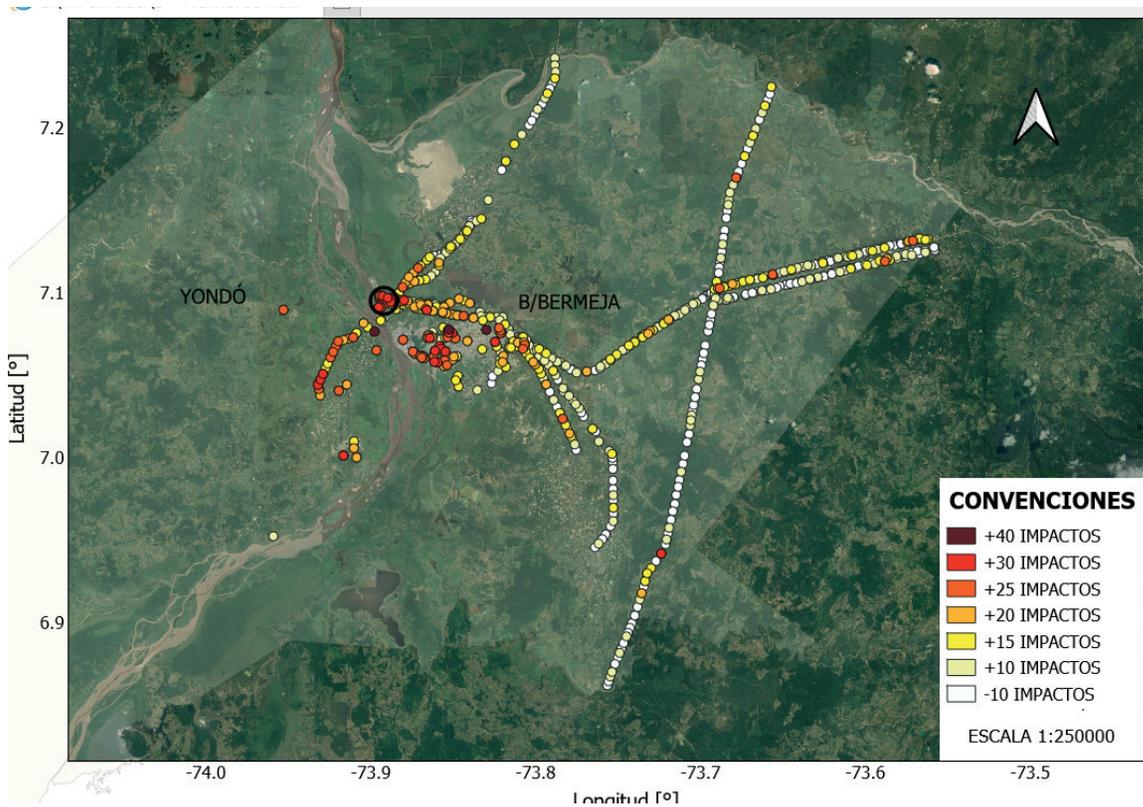


Figura 4. Caracterización de estructuras elevadas según la cantidad de impactos de rayo recibidas

Fuente: elaboración propia.

mobarranca (dentro de la circunferencia negra) y en las estructuras de las líneas de extra alta tensión que salen de esta subestación como la línea Barranca-Comuneros 230 kV.

Así mismo, algunas estructuras de las líneas que llegan a la subestación Lizama 115 kV provenientes de Barranca 115 kV y San Silvestre 115 kV presentan una importante interacción con descargas atmosféricas, como se observa en los puntos de coloración oscura a la derecha de la figura anterior. La figura 5 ilustra las veinte estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayo.

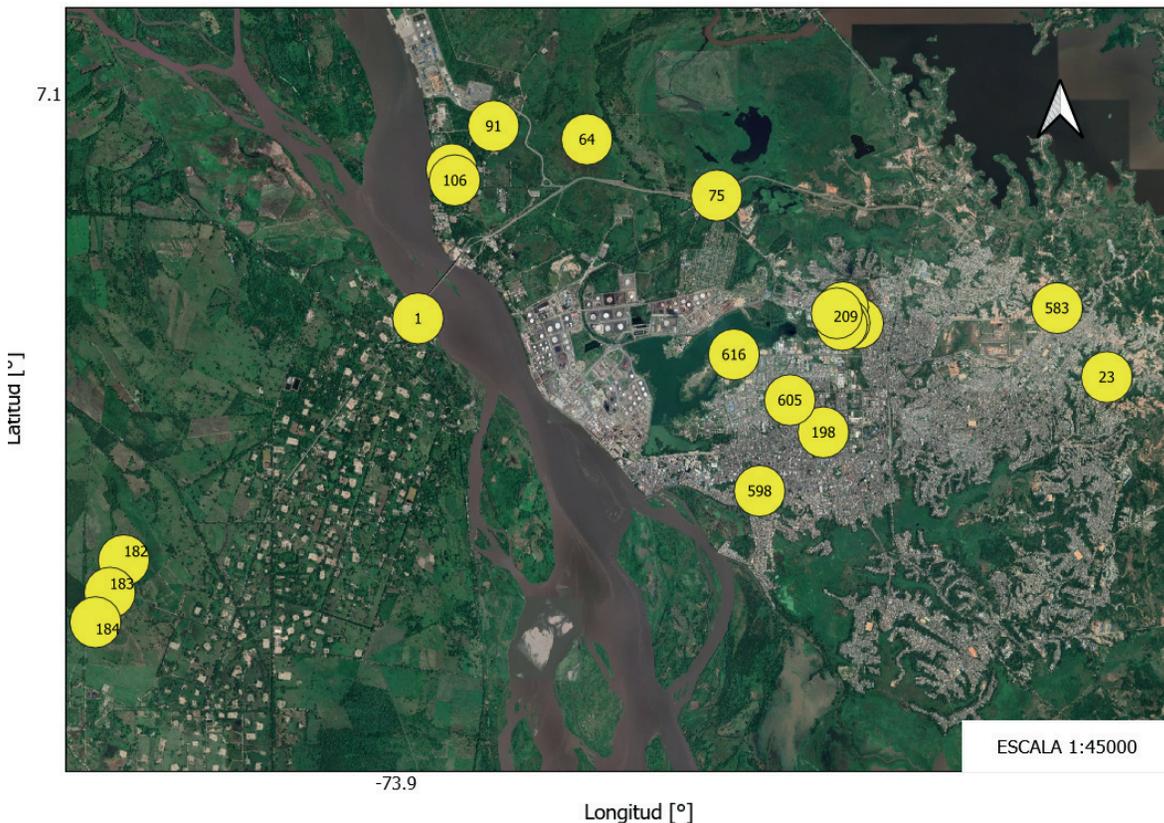


Figura 5. Estructuras elevadas con mayor número de impactos de rayo

Fuente: elaboración propia.

Estas estructuras, sus características, ubicación e impactos de rayo se muestran en la tabla 1, donde aparecen torres de transmisión (TRANS), antenas de telecomunicaciones (TELECO), edificaciones (EDIF), tanques elevados (TANQUE) y reflectores de estadio (REFL).

El 50% de estructuras elevadas con mayor número de impactos de rayo corresponden a torres de transmisión debido a que son las que presentan alturas mayores, las cuales varían entre 60 m y 70 m. La segunda estructura en la lista corresponde a un tanque elevado ubicado en el casco urbano de Barrancabermeja. Así mismo, aparecen dos antenas de telecomunicaciones de 50 m y seis edificaciones con alturas promedio de 40 m. Las estructuras 182, 183 y 184 corresponden a una línea de

Tabla 1. Estructuras con mayor número de impactos en Barrancabermeja-Yondó

Torre	Lat.	Long.	Tipo	Altura [m]	Impact
1	7,076	-73,898	TRANS	70	46
583	7,077	-73,830	TANQUE	50	41
585	7,077	-73,852	TELECO	50	41
184	7,044	-73,932	TRANS	60	39
609	7,077	-73,853	EDIF	50	39
182	7,051	-73,929	TRANS	60	37
23	7,070	-73,824	TRANS	60	36
587	7,076	-73,852	TELECO	50	36
209	7,076	-73,851	EDIF	40	35
598	7,058	-73,861	EDIF	40	35
106	7,091	-73,894	TRANS	70	34
183	7,047	-73,930	TRANS	60	34
605	7,068	-73,858	EDIF	40	34
607	7,076	-73,853	EDIF	40	34
64	7,10	-73,880	TRANS	60	33
75	7,089	-73,866	TRANS	60	33
91	7,097	-73,890	TRANS	60	33
105	7,092	-73,894	TRANS	70	33
198	7,06	-73,855	EDIF	40	33
616	7,072	-73,864	REFL	40	33

Fuente: elaboración propia.

transmisión de 115 kV en Yondó en donde, según estudios como (Aranguren *et al.*, 2017), se registra un aumento de la DDT.

Partiendo de la información de descargas nube-tierra suministrada por la Red LINET, se realizó un análisis diario para cada estructura entre noviembre de 2018 y noviembre de 2019. La figura 6 muestra la actividad de rayos el 23 de noviembre de 2018. Los puntos amarillos corresponden a descargas nube-tierra detectadas por la Red LINET, de los cuales los puntos rojos corresponden a descargas dentro del radio de influencia de la Red LMA, y por último, los puntos azules corresponden a descargas directas sobre alguna estructura elevada. Para este día en particular hubo 233 impactos (*strokes*) sobre estructuras elevadas, que alcanzaron una corriente máxima de -119,7 kA, de esta manera se pueden determinar las fechas de mayor interacción de impactos de rayo y estudiar su propagación a través de las fuentes mapeadas por la Red LMA en estudios posteriores.

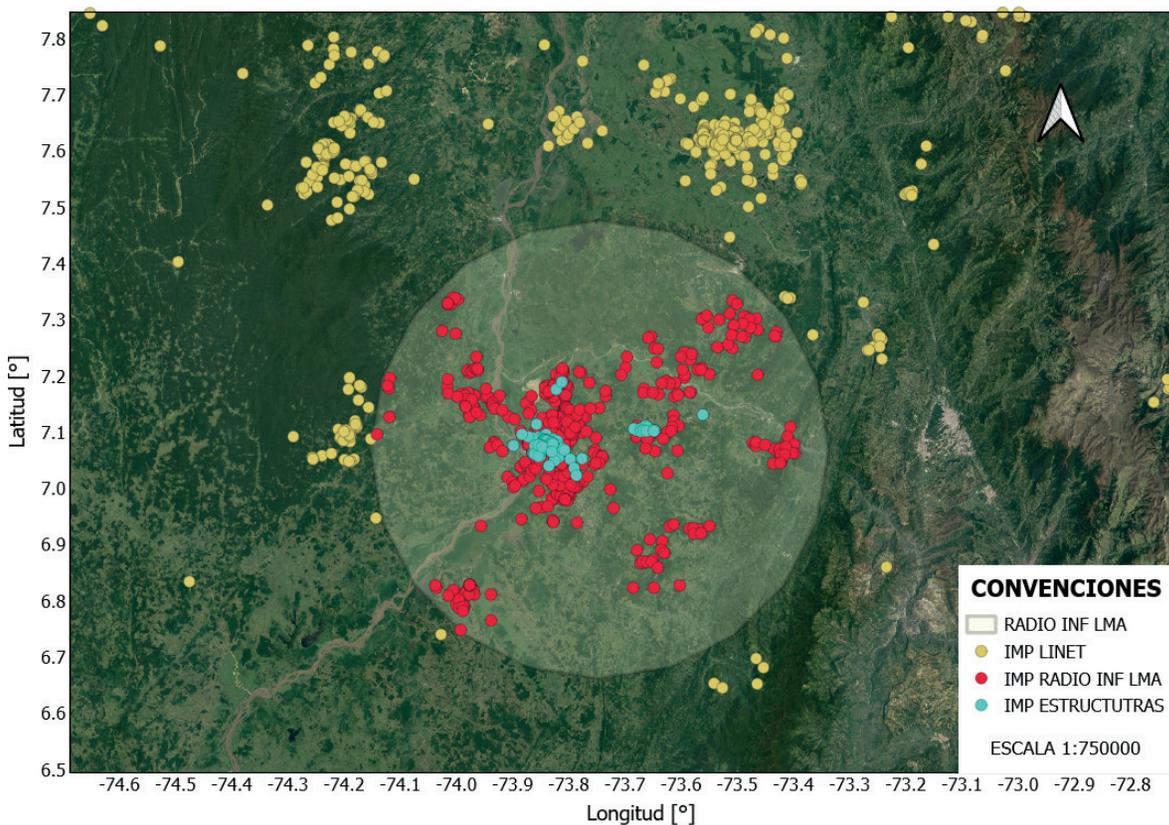


Figura 6. Impactos de rayo en estructuras elevadas el 23 de noviembre de 18

Fuente: elaboración propia.

Con base en lo anterior, en la tabla 2 se determinan los impactos de rayo en estructuras y la cantidad de impactos dentro del radio de influencia de la Red LMA por mes.

En mayo y noviembre se presenta una alta interacción de descargas atmosféricas con estructuras elevadas. Septiembre y octubre tienen una interacción media alta; junio, julio y agosto, un nivel medio; marzo y abril, un nivel medio-bajo, y diciembre, enero y febrero una baja interacción de rayos con estructuras elevadas. Este mismo comportamiento se presenta con las descargas dentro del radio de influencia de la Red LMA.

Haciendo un estudio más detallado, la tabla 3 muestra los días con mayor cantidad de impactos de rayo sobre estructuras elevadas.

Hotspots

Los sitios con mayor cantidad de impactos de rayo se muestran en la figura 7, en donde las tonalidades oscuras indican una mayor actividad de rayos.

Tabla 2. Impactos de rayo en estructuras y dentro del radio de influencia de la Red LMA entre noviembre de 2018 y 2019

Mes	Imp. estruct.	Imp. inf. LMA
Nov. 18	748	14587
Dic. 18	3	374
Ene. 19	3	755
Feb. 19	37	5221
Mar. 19	195	5794
Abr. 19	162	10600
May. 19	787	14567
Jun. 19	393	10420
Jul. 19	283	7549
Ago. 19	243	11955
Sep. 19	487	13482
Oct. 19	488	12640
Nov. 19	685	14994

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Días de mayor cantidad de impactos en estructuras elevadas

Día	Imp. estruct.
24/may./19	587
23/nov./18	233
13/nov./18	196
11/nov./19	193
16/sep./19	183
24/jun./19	168
02/oct./19	150
13/jul./19	145
04/nov./19	130
22/nov./18	117

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Sitios con mayor cantidad de impactos de rayo

<i>Hotspot</i>	Impactos	Latitud	Longitud
1	68	6,978	-73,976
2	62	7,022	-73,889
3	60	6,756	-74,307
4	59	6,908	-74,307
5	59	7,038	-73,889
6	58	6,929	-74,252
7	58	7,076	-73,899
8	58	6,956	-74,252
9	58	7,065	-74,138
10	56	6,978	-73,970
11	56	7,032	-73,921
12	56	7,043	-73,921
13	55	7,005	-73,948
14	55	7,060	-74,117
15	54	6,777	-74,312
16	54	7,070	-74,138
17	53	7,060	-74,133
18	53	7,022	-73,921
19	53	7,060	-74,111
20	52	6,875	-74,366

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta el periodo de estudio estipulado en la metodología, se encontraron 269 sitios con más de 40 impactos de rayo en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, siendo una zona boscosa ubicada al oriente de este último (con coordenadas geográficas 6.978, - 73.976) el sitio con mayor cantidad de impactos con un total de 68.

De la totalidad de *hotspots*, 34 se ubican en el municipio de Barrancabermeja y 235 en Yondó, esto último coincide con mapas de DDT realizados en la zona en donde se evidencia una alta la actividad de rayos en Yondó, en comparación con Barrancabermeja. Los recuadros en tonalidades oscuras que se muestran en la figura 5 (de 56 a 68 descargas) coinciden con los sitios de mayor cantidad de descargas por kilómetro cuadrado por año, o DDT, los cuales tienen entre 40,4 y 53,9 descargas/km²/año .

Para el caso de Yondó, la mayoría de sitios de alta actividad de rayos en la región occidental corresponden a zonas boscosas, y algunos de ellos se ubican cerca de la ribera del río Magdalena. En la

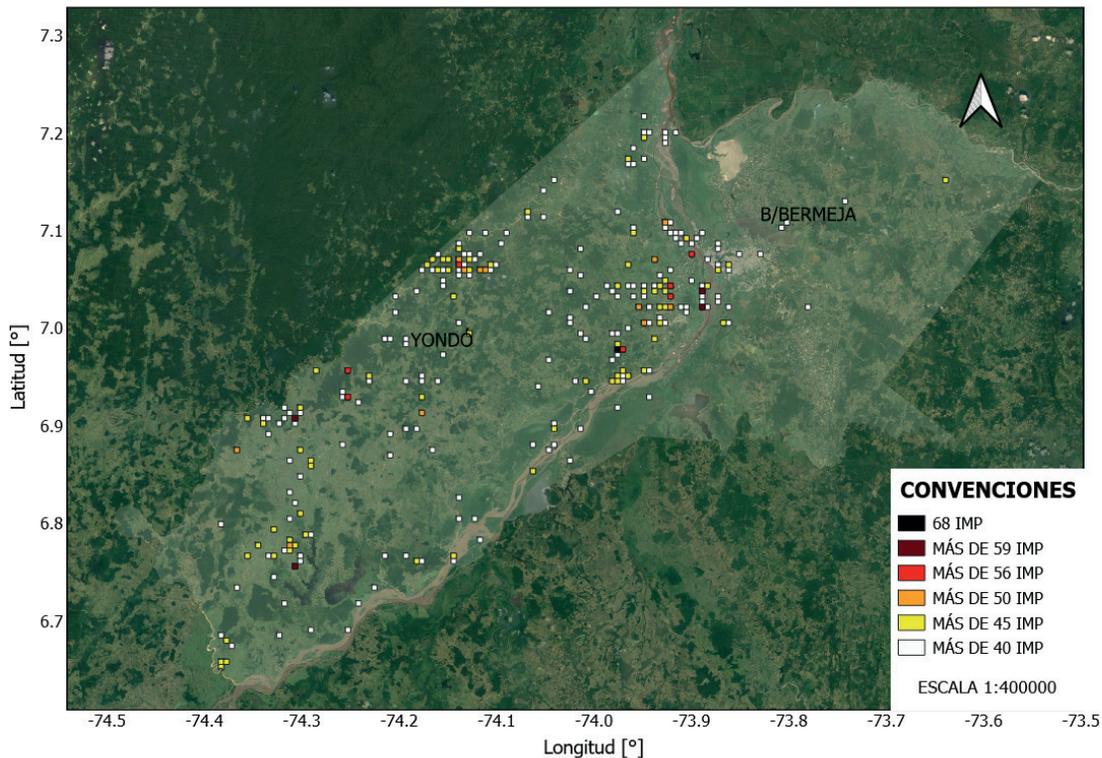


Figura 7. Sitios con mayor cantidad de impactos de rayo en los municipios de Barrancabermeja y Yondó

Fuente: elaboración propia.

región central se observa una zona de alta densidad de *hotspots* comprendida entre latitudes de 7.0 y 7.1 grados, y longitudes de -74.1 y -74.2 grados. En el costado oriental, los sitios de mayor actividad hallados se distribuyen ampliamente, algunos de ellos se hallan en campos petroleros cercanos al casco urbano de Yondó. Esta zona es la que presenta la mayor actividad de rayos ya que se encontraron al menos 7 sitios en donde hubo entre 59 y 68 impactos.

Para el caso de Barrancabermeja, se encontraron 9 *hotspots* en el casco urbano del municipio; otros 2, cercanos a la ciénaga de San Silvestre; 2, en la central de generación térmica Barranca, y los restantes, en zonas boscosas o en cercanas a la ribera del río Magdalena, como se observa en los costados norte y sur del municipio. De la totalidad de *hotspots* hallados, solo 4 de ellos presentan más de 45 impactos y en los sitios remanentes se registran al menos 40 impactos. La tabla 4 muestra los 20 sitios con mayor cantidad de impactos de rayo en los municipios de estudio.

Lo anterior se muestra en la figura 8 donde se evidencia que la totalidad de estos sitios se ubican en el municipio de Yondó, lo que es coincidente con mapas de DDT como el mostrado en (Aranguren *et al.*, 2017), donde se evidencia una amplia zona de mayor actividad de rayos en este municipio, en comparación con Barrancabermeja.

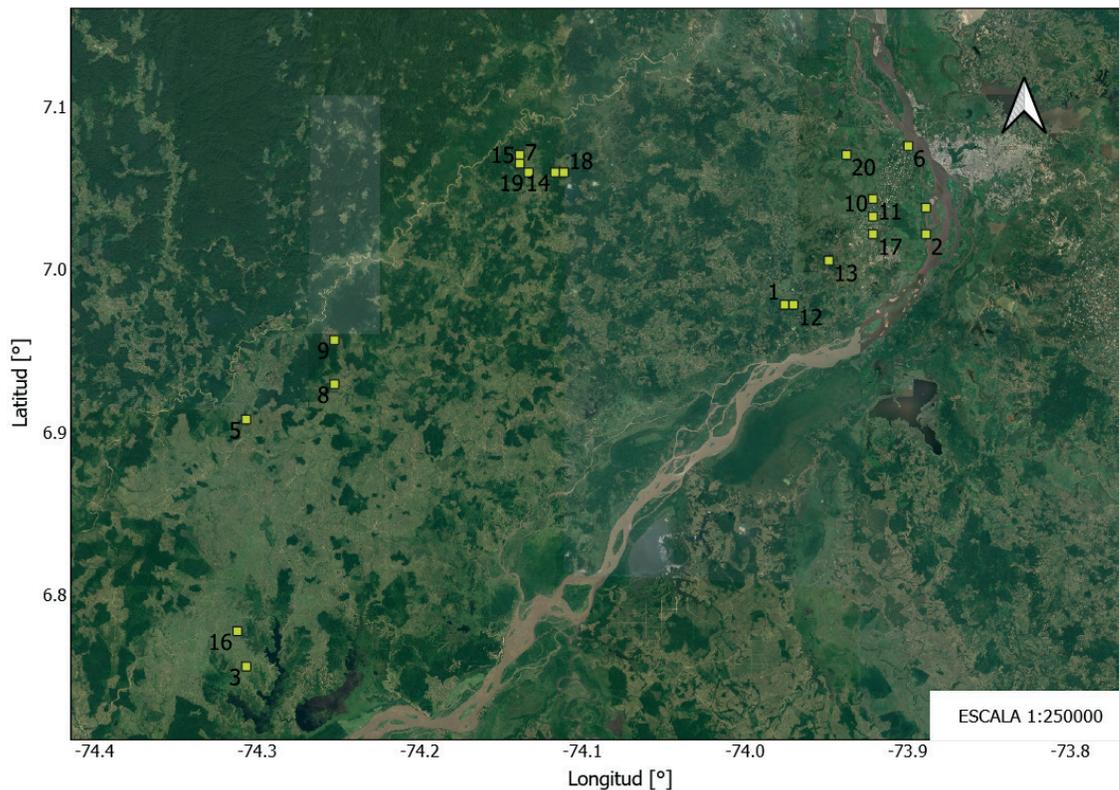


Figura 8. Primeros *hotspots* en Barrancabermeja y Yondó

Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, de la totalidad de *hostpots* hallados se determinó en cuántos de ellos se ubicó alguna estructura elevada, de las que se muestran en la figura 2, con el fin de estudiar su influencia en la cantidad de impactos de rayo en determinada región. En la figura 9 se evidencia lo expuesto anteriormente, se observan nueve torres de transmisión presentes en algún *hotspot*, las cuales, debido al elevado número de impactos, registran la más alta probabilidad de flameos inversos hacia los conductores de fase, lo que ocasiona salidas de las líneas. Así mismo se observa una importante influencia del urbanismo en la determinación de los sitios con mayor cantidad de impactos de rayo, esto se demuestra dado que en el casco urbano de Barrancabermeja se ubican 7 *hotspots*, de los cuales en 4 se localizan antenas de telecomunicaciones y en tres edificaciones.

CONCLUSIONES

Se localizaron 616 estructuras elevadas en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, de las cuales se escogieron las 20 con mayor cantidad de impactos de rayo que corresponden en un 50 % a torres de transmisión, siendo la estructura de mayor número de impactos una torre de transmisión

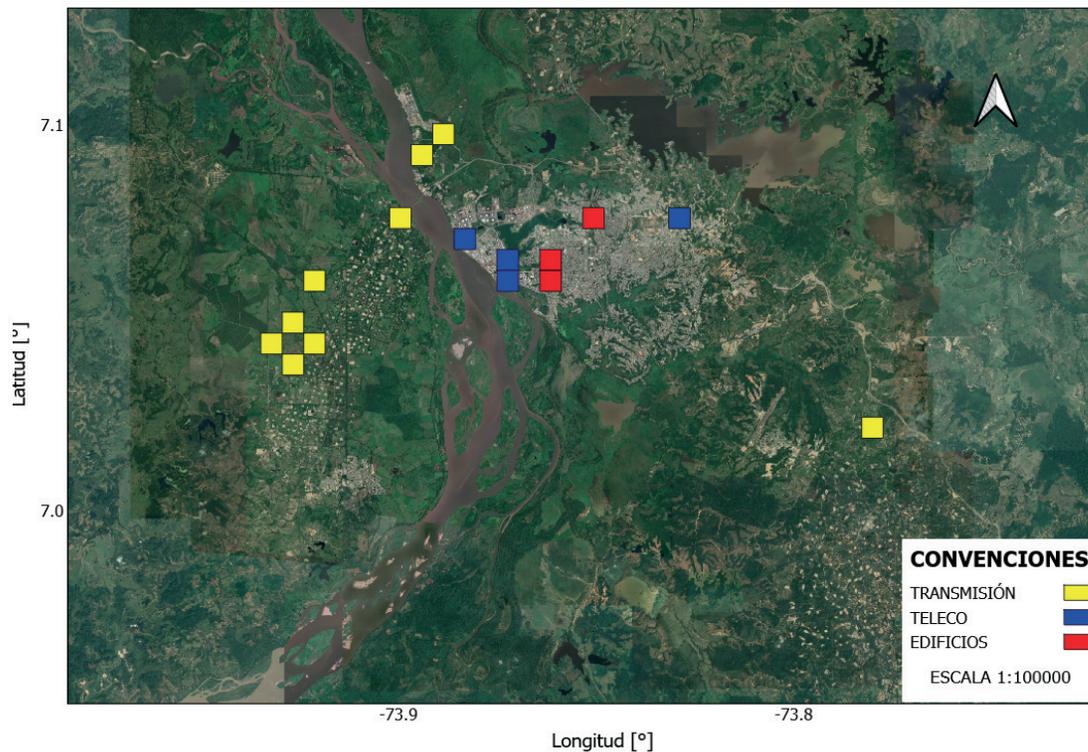


Figura 9. Estructuras elevadas presentes en los sitios de mayor cantidad de impactos de rayo

Fuente: elaboración propia.

de 70 m de altura localizada en límites de los dos municipios de estudio, con un total de 68 impactos. Estructuras elevadas presentes en el casco urbano de Barrancabermeja y la totalidad de las halladas en Yondó registran una importante interacción con descargas atmosféricas, así como las torres de transmisión cercanas a la central de generación térmica Termobarranca.

Se encontraron los sitios con mayor actividad de rayos, de los cuales, 34 se ubican en Barrancabermeja y 235 en Yondó, lo que concuerda con mapas de densidad de descargas a Tierra (DDT) hechos en la zona en donde se presenta un aumento en la cantidad de descargas por kilómetro cuadrado por año en Yondó, en comparación con Barrancabermeja.

De las 27 estructuras elevadas encontradas en Yondó, solo 6 se ubican en algún *hotspot*, lo que muestra que en este municipio la presencia de alguna estructura elevada no garantiza un *hotspot* y que los sitios de mayor actividad de rayos no se ven influenciados por la presencia de estructuras elevadas. Ahora bien, para el caso de Barrancabermeja, se hallaron 10 estructuras elevadas en algún *hotspot*, de las cuales 7 se ubican en el casco urbano donde se encontraron 9 *hotspots*, de donde se infiere que en este municipio el urbanismo y la presencia de estructuras elevadas sí aumenta la actividad de rayos.

FINANCIAMIENTO

Universidad Industrial de Santander.

REFERENCIAS

- [Albrecht *et al.*, 2016] Albrecht, R. I., Goodman, S. J., Buechler, D. E., Blakeslee, R. J. y Christian, H. J. (2016). Where are the lightning hotspots on Earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(11), 2051-2068. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00193.1> ↑Ver página 69
- [Aranguren *et al.*, 2017] Aranguren, D., López, J., Inampué, J., Torres, H. y Betz, H. (2017). Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 154, 182,189. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.08.010> ↑Ver página 69, 71, 77, 81
- [Avendaño e Ibáñez, 2000] Avendaño, C. A. y Ibáñez Olaya, H. F. (2000). Sobretensiones transitorias en sistemas eléctricos. *Tecnura*, 4(7), 43-48. <https://doi.org/10.14483/22487638.6105> ↑Ver página 69
- [Avendaño *et al.*, 2003] Avendaño, C. A., Ibáñez Olaya, H. F. y Ortiz Sánchez, H. E. (2003). Evaluación del riesgo de daño en sistemas eléctricos de baja tensión a causa de los rayos, bajo la metodología IEC. *Tecnura*, 6(12), 42-51. <https://doi.org/10.14483/22487638.6139> ↑Ver página 69
- [Candela Garolera *et al.*, 2015] Candela Garolera, A., Cummins, K. L., Madsen, S. F., Holboell, J. y Myers, J. D. (2015). Multiple lightning discharges in wind turbines associated with nearby cloud-to-ground lightning. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(2), 526-533. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2391013> ↑Ver página 70
- [Christian *et al.*, 2003] Christian, H. J., Blakeslee, R. J., Boccippio, D. J., Boeck, W. L., Buechler, D. E., Driscoll, K. T., Goodman, S. J., Hall, J. M., Koshak, W. J., Mach, D. M. y Stewart, M. F. (2003). Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 108(D1), ACL 4-1-ACL 4-15. <https://doi.org/10.1029/2002JD002347> ↑Ver página 69
- [Del Río Trujillo, 2018] Del Río Trujillo, D. F. (2018). *Evaluación del efecto urbano sobre los parámetros del rayo. Caso colombiano* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63293> ↑Ver página 70

- [Herrera *et al.*, 2018] Herrera, J., Younes, C. y Porras, L. (2018). Cloud-to-ground lightning activity in Colombia: A 14-year study using lightning location system data. *Atmospheric Research*, 203, 164-174. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.12.009> ↑Ver página 69
- [Ibáñez Olaya *et al.*, 2005] Ibáñez Olaya, H. F., Ortiz Suárez, H. E. y Avendaño Avendaño, C. A. (2005). Correlación entre la actividad ceráunea y la localización de daño en equipos eléctricos y electrónicos a causa de rayos en Bogotá, Colombia. *Tecnura*, 8(16), 86-93. <https://doi.org/10.14483/22487638.6235> ↑Ver página 69
- [Montanyà *et al.*, 2014] Montanyà, J., Van der Velde, O. y Williams, E. R. (2014). Lightning discharges produced by wind turbines. *Journal of Geophysical Research*, 119(3), 1455-1462. <https://doi.org/10.1002/2013JD020225> ↑Ver página 70
- [Mostajabi *et al.*, 2018] Mostajabi, A., Pineda, N., Romero, D., Azadifar, M., Van der Velde, O., Montanyà, J., Rubinstein, M. y Rachidi, F. (2018). LMA observation of upward flashes at Säntis Tower: Preliminary results. En *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC/APEMC 2018* (pp. 399-402). <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2018.8393808> ↑Ver página 70
- [Rachidi *et al.*, 2008] Rachidi, F., Rubinstein, M., Montanyà, J., Bermúdez, J. L., Rodríguez Sola, R., Solà, G. y Korovkin, N. (2008). A review of current issues in lightning protection of new-generation wind-turbine blades. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6), 2489-2496. <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.896443> ↑Ver página 70
- [Rakov y Uman, 2003] Rakov, V. A. y Uman, M. A. (2003). *Lightning: Physics and effects*. Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107340886> ↑Ver página 69, 70
- [Rison *et al.*, 1999] Rison, W., Thomas, R. J., Krehbiel, P. R., Hamlin, T. y Harlin, J. (1999). A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in Central New Mexico. *Geophysical Research Letters*, 26(23), 3573-3576. <https://doi.org/10.1029/1999GL010856> ↑Ver página 71
- [Williams, 2001] Williams, E. (2001). *Severe convective storms*. American Meteorological Society. ↑Ver página 71
- [Torres, 2002] Torres, H. (2002). *El rayo: mitos, leyendas, ciencia y tecnología*. Unilibros. ↑Ver página 69



Low-cost Prototype Pyrgeometer for Atmospheric Radiation Measurements

Prototipo de pirgeómetro de bajo costo para mediciones de radiación atmosférica

Yuber Otálora-Porras ¹, Cristian Camilo Serrano-Franco ², César Alexander Chacón-Cardona ³

Fecha de Recepción: 23 de octubre de 2021

Fecha de Aceptación: 20 de abril de 2022

Cómo citar: Otálora-Porras., Y. Serrano-Franco., C.C y Chacón-Cardona ., C.A. (2022). Low-cost Prototype Pyrgeometer for Atmospheric Radiation Measurements. *Tecnura*, 26(73), 86-97. <https://doi.org/10.14483/22487638.19157>

Abstract

Objective: To design and build an instrument capable of measuring long-wave infrared radiation with elements of the national market that offers an excellent performance in measuring energy in this spectral band.

Methodology: The best design was determined based on other existing instruments, innovating its development by using materials that are easily accessible in the country, and its operation was verified by characterizing an incandescent light bulb used as an infrared radiation pattern. Then, the radiation measured by the instrument was compared to that emitted by the source by means of an experimental setup that involved measuring the temperature at several distances.

Results: A functional prototype was obtained, and its operation could be verified through a series of irradiance measurements according to the Stefan-Boltzmann law, through a calibration process with a known radiation source.

Conclusions: A radiometric instrument for the thermal infrared band was designed and built. Raw materials and electronic components were used which were available in the local market, thus noticeably reducing the equipment's production costs.

Funding: This research was funded by the authors.

Keywords: emissivity, black body, thermal radiation, irradiance, pyrgeometer.

¹Student of the Electronics Technician program (propaedeutic cycles). Student, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

Email: yuotalorap@correo.udistrital.edu.co

²Student of the Electronics Technician program (propaedeutic cycles). Student, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

Email: ccserranof@correo.udistrital.edu.co

³Posgraduate studies: Master's and Doctoral Degrees in Science, Physics; Undergraduate studies: physicist. Assistant professor at Universidad Distrital Francisco José de Caldas and member of the Electromagnetic Compatibility (CEM) research group, Bogotá D.C, Colombia.

Email: cachaconc@udistrital.edu.co

Resumen

Objetivo: Diseñar y construir un instrumento capaz de medir la radiación infrarroja de onda larga con elementos del mercado nacional que ofrezca un excelente desempeño en la cuantificación de energía en esta banda espectral.

Metodología: Se determinó el mejor diseño, basado en otros instrumentos ya existentes, innovando su desarrollo mediante el uso de materiales de fácil acceso en el país, y se comprobó su funcionamiento mediante la caracterización de una bombilla incandescente usada como patrón de radiación infrarroja. Luego se comparó la radiación medida por el instrumento con la radiación emitida por la fuente mediante un montaje experimental en el que se midió la temperatura a diversas distancias.

Resultados: Se obtuvo un prototipo funcional, siendo posible constatar su funcionamiento mediante una serie de medidas de irradiancia en consonancia con la ley de Stefan-Boltzmann, a través de un proceso de calibración con una fuente de radiación conocida.

Conclusiones: Se diseñó y construyó un instrumento radiométrico para la banda espectral del infrarrojo térmico. Se emplearon materias primas y componentes electrónicos disponibles en el medio local, reduciendo notablemente los costos de producción del equipo.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por los autores.

Palabras clave: emisividad, cuerpo negro, radiación térmica, irradiancia, pirgeómetro

Table of Contents

	Page
Introduction	88
Theoretical foundations	88
Stefan-Boltzmann law	89
Methodology	89
Instrument design	89
Characterization of the bulb	90
Results	92
Characterization of the bulb	92
Measurements with the instrument at different distances	92
Conclusions	95
Funding	96
References	96

INTRODUCTION

Currently, meteorology, particularly agricultural meteorology, utilizes very well-developed equipment. This includes the pyrgeometer, an instrument for measuring long-wave infrared radiation, whose acquisition costs are excessive, which limits energy quantification and research on radiation-atmosphere interaction, since, in order to analyze this phenomenon, it is necessary to perform precise and quantified measurements (Stoffel *et al.*, 2006).

Infrared radiation (IR), is one of the several types of radiation that conform the electromagnetic spectrum, in addition to visible and ultraviolet radiation, gamma rays, etc. The infrared band covers all wavelengths between 740 nm and 1 mm. It is possible to subdivide the IR strip into three regions based on its wavelength, as shown in Table 1.

Table 1. Spectral domain of infrared radiation

Type IR	Radiation	Wavelength – λ (μm)
Short wave	IR-A	0,76 – 2
Medium wave	IR-B	2 – 4
Long wave	IR-C	4 – 1000

Source: Valea-Pérez & Alonso-Girón, 1998.

Therefore, an instrument capable of measuring long wave radiation with components that are easily accessible in the local market was designed and built in this study, as a contribution for creating agricultural alert networks and performing energy balances and climate control in greenhouses (Gloyne & Lomas, 1980, Fairall *et al.*, 1998), thus generating greater yields in harvests and allowing to establish meteorological stations or complement existing ones.

THEORETICAL FOUNDATIONS

A black body is one that has the ability to absorb all of the radiation it receives. it also emits radiation at any temperature greater than 0 K at various wavelengths. This is possible because none of the absorbed radiation is reflected or transmitted. Hence the name, because it is due to this phenomenon that the human eye perceives these bodies to be of a deep black color (Manrique-Valadez, 2002).

Because the sun behaves as a black body with a 6.000 K surface temperature and is the main source of energy on Earth, it has become necessary to develop instruments capable of quantifying this energy in the different bands of the electromagnetic spectrum. A pyrgeometer is one of such instruments, basically composed of an appropriate housing for outdoor exposure, a transducer element

responsible for the detection of thermal infrared radiation (both from the sun and the atmosphere), and a dome that is in charge of filtering components of the electromagnetic spectrum which are outside the long-wave IR.

Stefan-Boltzmann law

The Stefan-Boltzmann law establishes a relationship between the power per unit area radiated by a black body and its surface temperature. This relationship is expressed by Equation (1).

$$E = \sigma T^4 \quad (1)$$

where σ is the Stefan-Boltzmann constant and has a value of $5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ (International Unit System). This shows a large increase in the power per unit area radiated by a body in relation to its temperature (Valea-Pérez & Alonso-Girón, 1998). Equation (2) is used for a real surface (not a black body),

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

where the emissivity coefficient is represented by ε , referring to the ability to emit radiation within a range between 0 and 1, which depends on the wavelength at which said body emits, as well as on the surface temperature (Valea-Pérez & Alonso-Girón, 1998). Due to the properties of space, there is a relationship between the power radiated by a source and the distance of the object that receives it. This relationship is established through Equation (3) (Marín-Naranjo, 2011):

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (3)$$

where I is the irradiance of the source, P is the total radiation power emitted by the source, and r is the separation distance between the source and the receiver.

METHODOLOGY

Instrument design

The housing was made of 304 stainless steel, a material selected due to its low thermal conductivity coefficient compared to other metals, which minimizes errors caused by internal heating in the measurements of the instrument (Carbone Stainless Steel, n.d.). The housing is composed of two parts: the first one is a base with a porthole level and its corresponding screws, with the purpose of adjusting the degrees of inclination of the sensor; and the second one is the body, a hollow structure in which the circuit is located, as well as a 4-pin mini-din port for feeding and extracting information from the instrument, a Fresnel lens (a component responsible for filtering the radiation that reaches

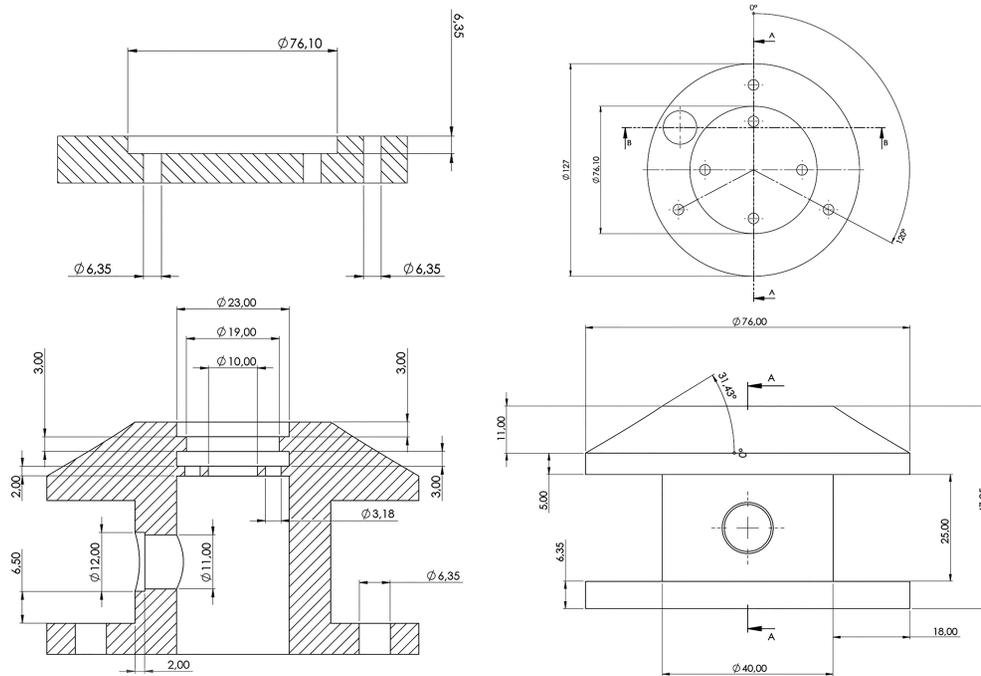


Figure 1. Plans: above, base of the instrument; down, body of the instrument

Source: Authors.

the transducer) and, inside it, silica gel, whose objective is to eliminate excess humidity. Figure 1 shows the technical specifications of the constructed housing.

The printed circuit consists of the transducer, a contactless temperature sensor manufactured by the MELEXIS company (MLX90614B), which detects the temperature by means of a thermopile. It is equipped with an optical filter which rejects radiation outside a range between 5,5 and 14 μm . The sensor output is based on an I^2C communication protocol and has a resolution of 0,02 $^{\circ}\text{C}$. (Melexis, n.d.). A necessary buffer was implemented to allow transmitting the characteristic signals of the I^2C through a shielded cable. Passive components such as a 10 $\text{K}\Omega$ resistor pair and a 0,1 μF capacitor were also included. Figure 2 is a representation of the circuit connections.

Characterization of the bulb

The first task involved determining a known radiation source. A 250 W incandescent bulb was used, which had to be characterized in order to quantify the amount of energy radiated by its tungsten filament. This bulb was disassembled to measure its dimensions, with the purpose of calculating its resistivity by means of the formula $\rho = \frac{A}{l}R$, where the resistance R is obtained from the voltage and current values measured on the bulb. Based on the data published in the article by Desai et al., 1984, the function $\rho = aT^2 + bT + c$ was obtained using a least squares approximation, where the resistivity depends on the temperature. This yields the solution of quadratic Equation (4), where the

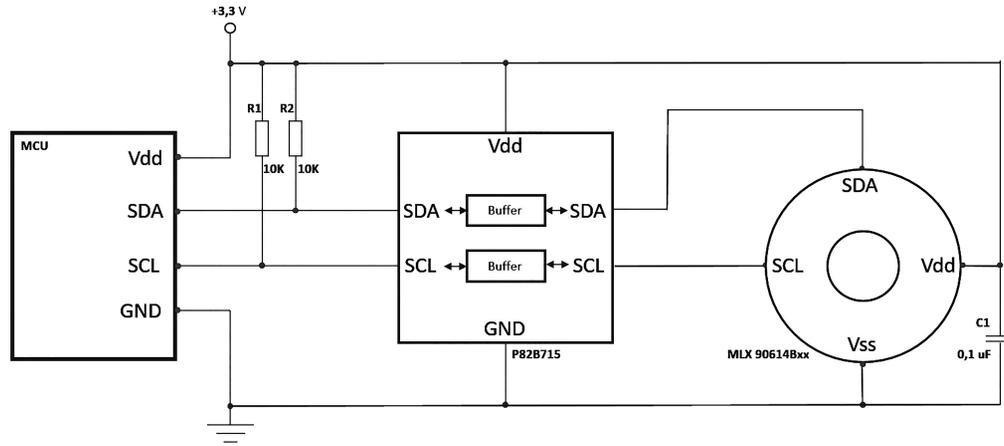


Figure 2. Connection scheme of the electronic circuit

Source: Authors.

temperature is a function of resistivity.

$$T = \frac{(-b) \pm \sqrt{b^2 - 4a(c - \rho)}}{2a} \quad (4)$$

with:

$$\begin{aligned} a &= 2,783984052381960 \times 10^{-14} & \Delta a &= 8,14033086876842 \times 10^{-16} \\ b &= 2,33180658830572 \times 10^{-10} & \Delta b &= 2,65298419518553 \times 10^{-12} \\ c &= -1,08789445864861 \times 10^{-8} & \Delta c &= 1,39717705908403 \times 10^{-9} \end{aligned}$$

After obtaining the emitted temperature, the emissivity of the bulb was determined via Equation (5) (Hu & Lucyszyn, 2015), which is essential to finding its irradiance with Equation (2) and comparing it with the irradiance captured by the constructed instrument.

$$\varepsilon = (1,343 \times 10^{-4} \times T) - 2,019 \times 10^{-2} \quad (5)$$

To calibrate the instrument, a method involving the characterization of a known radiation source was used. In order to observe the behavior of the instrument according to the inverse-square law, the instrument was installed in an optimal position to capture the radiation generated by the known source. In addition, a mechanism was built with two wooden supports in order to vary the distance between the radiation source and the sensor, always with stable potential and current differences in the bulb. The experiments were performed inside a room with a heating system that allowed taking measurements within a range of atmospheric temperatures.

RESULTS

Characterization of the bulb

Table 2 shows the data obtained according to the voltage variation in the bulb regarding its characterization, which includes the calculations of resistivity, temperature, and emissivity for the radiation source.

Table 2. Data for the characterization of the bulb

V [V]	I[A]	R[Ω]	ΔR[Ω]	ρ[Ωm]	Δρ[Ω m]	T[K]	ΔT[K]	ε	I [W/m ²]
16,88	0,95	177,684	9,357E-02	2,509E-07	2,076E-08	1,003E+03	88,683	1,144E-01	6,558E+03
24,35	1,08	225,463	1,044E-01	3,184E-07	2,613E-08	1,231E+03	106,157	1,451E-01	1,890E+04
31,55	1,19	265,126	1,114E-01	3,744E-07	3,057E-08	1,414E+03	119,736	1,697E-01	3,841E+04
40,00	1,32	303,030	1,148E-01	4,279E-07	3,476E-08	1,583E+03	131,959	1,924E-01	6,843E+04
47,60	1,43	332,867	1,164E-01	4,700E-07	3,805E-08	1,712E+03	141,167	2,098E-01	1,023E+05
54,70	1,53	357,516	1,169E-01	5,048E-07	4,075E-08	1,817E+03	148,515	2,239E-01	1,385E+05
62,22	1,63	381,718	1,171E-01	5,390E-07	4,340E-08	1,919E+03	155,542	2,375E-01	1,825E+05
69,30	1,72	402,907	1,172E-01	5,689E-07	4,572E-08	2,006E+03	161,5512	2,492E-01	2,288E+05
75,60	1,79	422,346	1,180E-01	5,964E-07	4,786E-08	2,085E+03	166,991	2,598E-01	2,785E+05
85,30	1,91	446,597	1,169E-01	6,306E-07	5,050E-08	2,182E+03	173,556	2,729E-01	3,510E+05
93,70	2,00	468,500	1,172E-01	6,615E-07	5,289E-08	2,269E+03	179,412	2,845E-01	4,276E+05
100,70	2,07	486,473	1,175E-01	6,869E-07	5,487E-08	2,339E+03	184,143	2,940E-01	4,991E+05
105,00	2,12	495,283	1,168E-01	6,994E-07	5,582E-08	2,373E+03	186,402	2,986E-01	5,371E+05
108,80	2,12	513,208	1,211E-01	7,247E-07	5,784E-08	2,442E+03	191,163	3,078E-01	6,209E+05
112,50	2,15	523,256	1,217E-01	7,389E-07	5,895E-08	2,481E+03	193,736	3,130E-01	6,719E+05

Source: Authors.

Measurements with the instrument at different distances

The data taken by the sensor were recorded during the test performed with the known radiation source at a constant power of $2,5794 \times 10^2$ W, which was determined from the formula $P = A_s \varepsilon \sigma T^4$, varying the separation distances between the source and sensor. In the formula, P is the power radiated by the source, A_s is the superficial area of the tungsten filament, ε is the emissivity of the filament, σ is the Stefan-Boltzmann constant, and T is the temperature of the filament.

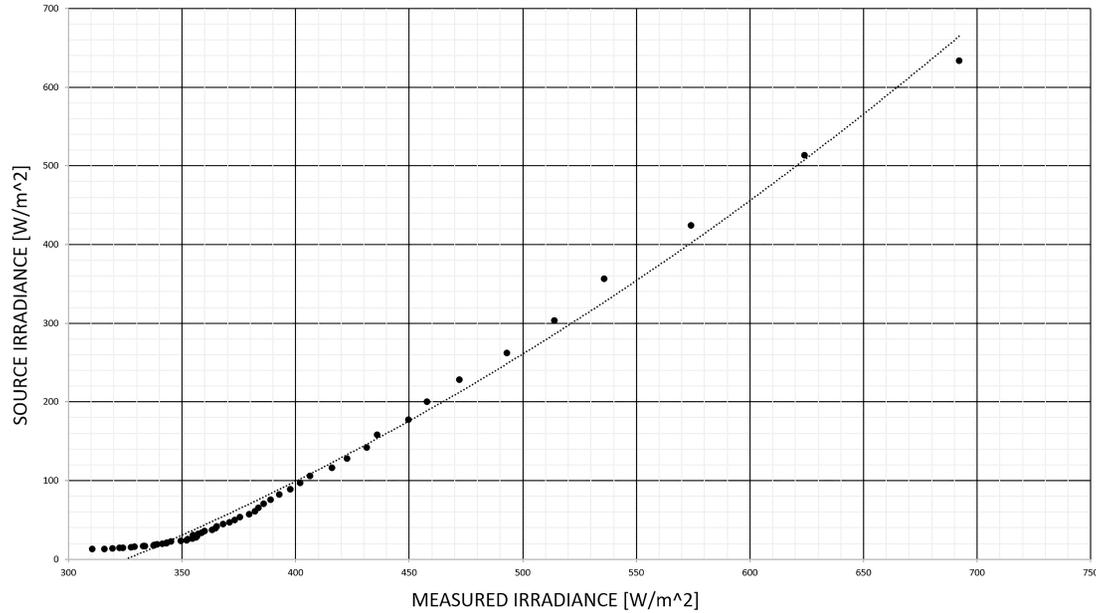


Figure 3. Expected vs. measured values (-0,97 - 59,39 °C)

Source: Authors.

In Figure 3, it is possible to identify the behavior of the sensor with respect to the radiation values emitted by the source at different distances. From the graph, a non-linear behavior is evidenced, resulting in the trend curve described by Equation (6), with a correlation coefficient $R^2 = 0,990691767716456$. This equation was used to adjust the data according to their corresponding error percentage.

$$y = 0,001663124222932x^2 + 0,120752206474762x - 215,321781365393 \quad (6)$$

A second approximation was made which consisted of separating the behavior into two regions, with the purpose of minimizing uncertainty.

Figure 4 shows the trend curve described by Equation (7), with a correlation coefficient $R^2 = 0,990066461453337$.

$$y = 0,012480906478559 x^2 - 7,97421394258089 x + 1,287,33404035389 \quad (7)$$

In the second region, the best approximation is linear (Figure 5)

The trend curve described by Equation (8) has a correlation coefficient $R^2 = 0,999046006003953$.

$$y = 1,86808371171146 x - 654,699534232818 \quad (8)$$

In Equations (7) and (8), the data were adjusted with their corresponding error percentage. Figure 6 shows the linear relationship between the measured irradiance and the inverse of the squared distance with respect to the emitting source. This, in a range of -0,97 - 59,39 °C.

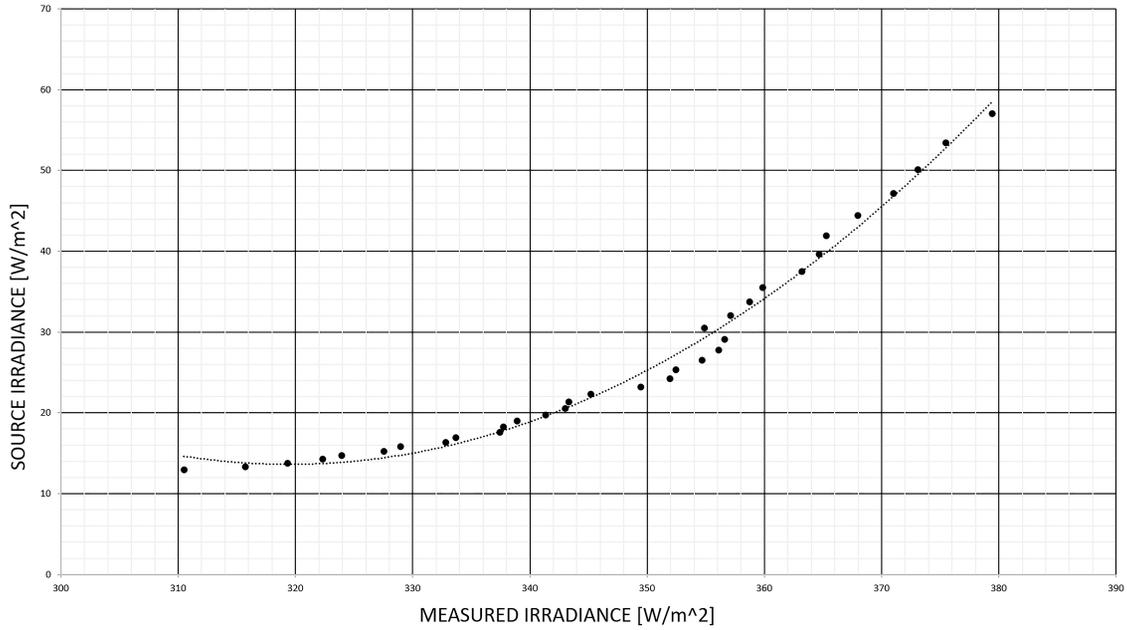


Figure 4. Expected vs. measured values (-0,97 - 13,01 °C)

Source: Authors.

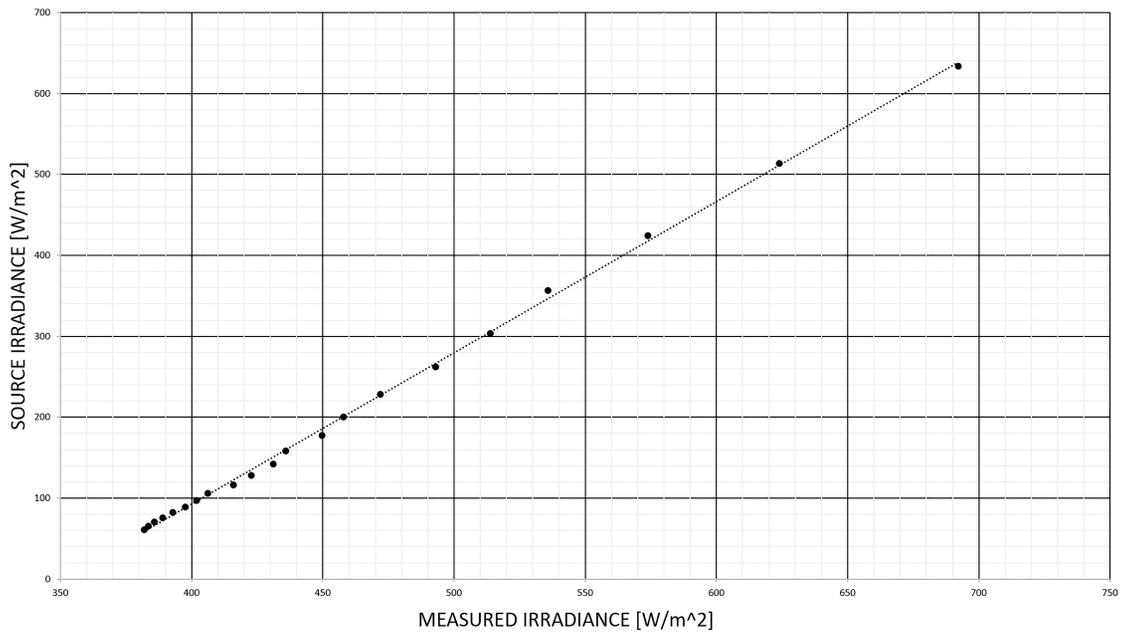


Figure 5. Expected vs. measured values (13,49 - 59,39 °C)

Source: Authors.

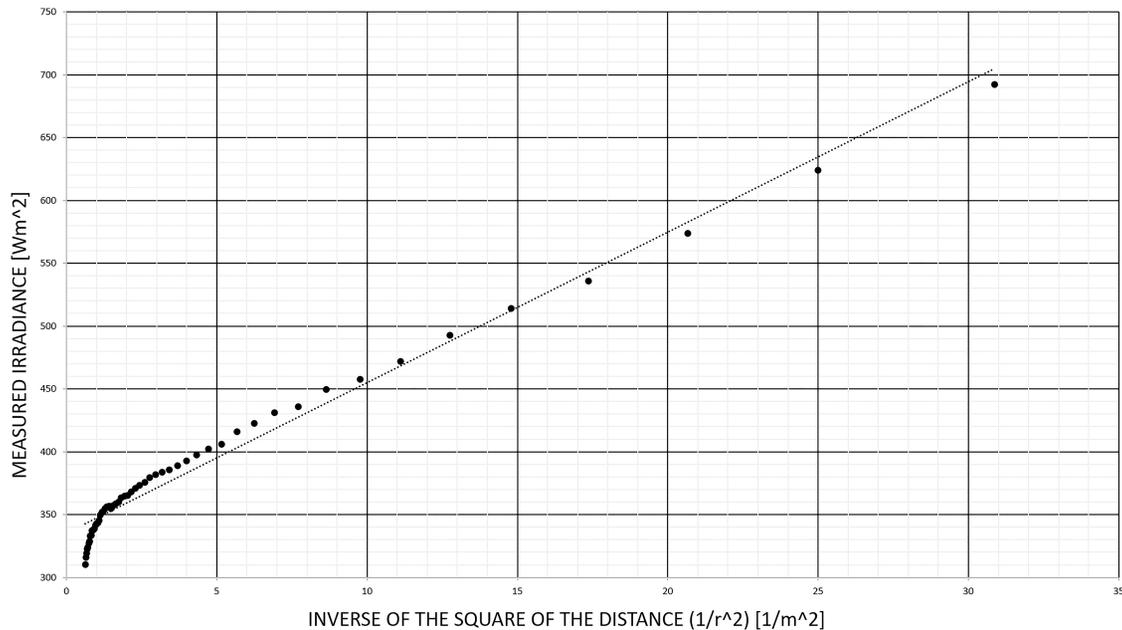


Figure 6. Radiometer behavior with regard to its distance to the source

Source: Authors.

CONCLUSIONS

The elaborated instrument shows an excellent performance in the measurement of atmospheric radiation because it has a good response in a range of atmospheric temperatures ($-0,97 - 59,39$ °C) at a considerably low cost (US\$ 3.000) compared to similar instruments found in the international market.

The FRESNEL lens fulfills a fundamental task in the capture and filtration of infrared radiation, thus allowing the transducer to measure correctly by concentrating the infrared thermal radiation towards it.

The characterization of the bulb served as a method to evaluate a known radiation source, through which the sensor could be reliably calibrated.

The instrument was developed with elements that are easily accessible in the national market, thus significantly reducing its production costs. The instrument can be used in the area of solar radiometry, in agricultural productivity measurements, and in instrumentation studies in the field of meteorology.

In the future, it is necessary to compare this instrument with standard equipment, given that the standard pyradiometer of the Colombian Institute for Hydrology, Meteorology, and Environmental Studies (IDEAM) was not available for measurements.

FUNDING

This research was entirely funded by the work team. Universidad Distrital Francisco José de Caldas contributed through its laboratories with the necessary infrastructure and equipment for the execution of the project. The Metal-Mechanic Center of the National Learning Service (SENA, a Colombian education institution) contributed with infrastructure, machinery, and part of its personnel, which was of great help in the construction of the instrument's housing.

REFERENCES

- [Carbone Stainless Steel, n.d.] Carbone Stainless Steel (n.d.). *Ficha técnica del acero inoxidable*. <https://www.empresascarbhone.com/pdf/ficha-tecnica-del-acero-inoxidable.pdf>
↑Ver página 89
- [Desai *et al.*, 1984] Desai, P. D., Chu, T. K., James, H. M., & Ho, C. Y. (1984). Electrical resistivity of selected elements. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 13(4), 1069-1096. <https://doi.org/10.1063/1.555723> ↑Ver página 90
- [Enz *et al.*, 1975] Enz, J. W., Klink, J. C., & Baker, D. G. (1975). Solar radiation effects on pyrgeometer performance. *Journal of Applied Meteorology*, 14(7), 1297-1302. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1975\)014<1297:SREOPP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1975)014<1297:SREOPP>2.0.CO;2) ↑Ver página
- [Fairall *et al.*, 1998] Fairall, C. W., Persson, P. O. G., Bradley, E. F., Payne, R. E., & Anderson, S. P. (1998). A new look at calibration and use of Eppley precision infrared radiometers. Part I: Theory and application. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(6), 1229-1242. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1998\)015%3C1229:ANLACA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015%3C1229:ANLACA%3E2.0.CO;2) ↑Ver página 88
- [Gloyne & Lomas, 1980] Gloyne, R. W., & Lomas, J. (1980). *Lecture notes for training class II and class III agricultural meteorological personnel*. Secretariat of the World Meteorological Organization. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=1046 ↑Ver página 88
- [Hu & Lucyszyn, 2015] Hu, F., & Lucyszyn, S. (2015). Modelling Miniature incandescent light bulbs for thermal infrared 'THz Torch' applications. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 36(4), 350-367. <https://doi.org/10.1007/s10762-014-0130-8> ↑Ver página 91
- [Kano & Suzuki, 1976] Kano, M., & Suzuki, M. (1976). On the calibration of the radiometer for long-wave radiation. II - The case of pyrgeometer. *Papers Meteorology Geophysics*, 27, 33-39. https://doi.org/10.2467/mripapers1950.27.1_33 ↑Ver página
- [Manrique-Valadez, 2002] Manrique-Valadez, J. A. (2002). *Transferencia de calor* (2nd ed.). Oxford University Press. ↑Ver página 88

- [Marín-Naranjo, 2011] Marín-Naranjo, L. D. (2011). Análisis de la ley de cuadrado inverso para medición práctica de iluminancia. *Revista Ingeniería*, 19(1), 687. <https://doi.org/10.15517/ring.v19i1.687> ↑Ver página 89
- [Melexis, n.d.] Melexis (n.d). *MLX90614 datasheet*. <https://www.melexis.com/en/documents/documentation/datasheets/datasheet-mlx90614> ↑Ver página 90
- [Polo, 2010] Polo, J. (2010). *Optimización de modelos de estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite* (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España. ↑Ver página
- [Stoffel *et al.*, 2006] Stoffel, T., Reda, I., Hickey, J., Dutton, E., & Michalsky, J. (2006). *Pyrgometer calibrations for the atmospheric radiation measurement program: Updated approach*. https://www.arm.gov/publications/proceedings/conf16/extended_abs/stoffel_t.pdf ↑Ver página 88
- [Valea-Pérez & Alonso-Girón, 1998] Valea-Pérez, Á., & Alonso-Girón, J. M. (1998). *Radiación Infrarroja y Ultravioleta. Tecnología y aplicaciones*. McGraw-Hill. ↑Ver página 88, 89



Medición de parámetros en líneas de transmisión con sistemas embebidos

Measuring parameters in transmission lines with embedded systems

Angelo Joseph Soto-Vergel ¹, Jorge Enrique Herrera-Rubio ², Darwin Orlando Cardozo-Sarmiento ³

Fecha de Recepción: 11 de septiembre de 2021

Fecha de Aceptación: 20 de abril de 2022

Cómo citar: Soto-Vergel, A.J. Herrera-Rubio, J.E. y Cardozo-Sarmiento, D.O. (2022). Medición de parámetros en líneas de transmisión con sistemas embebidos. *Tecnura*, 26(73), 98-114. <https://doi.org/10.14483/22487638.18131>

Resumen

Contexto: Las líneas de transmisión son estructuras construidas de material uniforme, dispuestas como un arreglo de pares de conductores o semiconductores, que guían las ondas electromagnéticas que transportan la energía de radiofrecuencia entre un dispositivo emisor y otro receptor. Su importancia en las comunicaciones radica en el conocimiento de sus parámetros fundamentales, para lo cual se requiere de equipos de medida especializados e instrumentos de laboratorio que proporcionen información para tomar decisiones de importancia en el acople de tecnologías en los sistemas de transmisión de datos.

Objetivo: Explicar el funcionamiento de un sistema de medición de parámetros de líneas de transmisión como propuesta de bajo costo y automatizada para su caracterización, implementado mediante sistemas embebidos.

Metodología: Para ello, se creó e implementó una arquitectura de *hardware* y *software*, con el uso de entradas análogas para medir tanto la atenuación e interrupciones digitales y temporizadas, como el retardo entre las ondas incidente y transmitida. Con estos datos se calculó la impedancia característica, constante de atenuación, constante de fase, velocidad de propagación, resistencia, conductancia, capacitancia e inductancia, mediante ecuaciones experimentales. Se realizaron cuatro experimentos utilizando 305 metros de cable coaxial; se comprobaron los datos obtenidos con los teóricos del fabricante, los cuales se validaron con medidas de equipos de instrumentación electrónica especializados, como el generador de funciones y el osciloscopio digital, con el objetivo de conocer el error de la herramienta diseñada frente a instrumentos avanzados.

¹Ingeniero electrónico, tecnólogo en Análisis y Diseño de Sistemas de Información, especialista en Tecnologías Avanzadas para el Desarrollo de Software, magíster en Educación Matemática. Docente de la Universidad Francisco de Paula Santander, Norte de Santander, Colombia.

Email: angelojosephsv@ufps.edu.co

²Ingeniero electrónico, especialista en Telecomunicaciones, magíster en Ingeniería Electrónica, doctor en Ciencias. Docente de la Universidad de Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Email: jherrera@unipamplona.edu.co

³Ingeniero electrónico, magíster en Ingeniería Electrónica. Docente de la Universidad Francisco de Paula Santander, Norte de Santander, Colombia.

Email: darwinorlandocs@ufps.edu.co

Resultados: Se construyó un dispositivo que calcula los parámetros básicos de una línea de transmisión con un error entre 3% y 9% en las mediciones.

Conclusiones: La herramienta desarrollada entrega resultados cercanos a los valores teóricos y, al compararse con los instrumentos (osciloscopio digital y generador de funciones), mide de forma exacta la impedancia característica; presenta un error porcentual del 3,7% cuando mide la constante de fase; y registra un error porcentual menor del 9% cuando calcula constante de atenuación, retardo, velocidad de propagación, resistencia, conductancia, capacitancia e inductancia. Esto determina que el error máximo de las mediciones es 8,98%, y así se demuestra que el dispositivo desarrollado es adecuado para la medición de los parámetros de las líneas de transmisión.

Financiamiento: Universidad de Pamplona.

Palabras clave: arduino, líneas de transmisión, sistema de medición, sistemas embebidos, telecomunicaciones.

Abstract

Context: Transmission lines are structures constructed of uniform material arranged as an array of conductor or semiconductor pairs to guide electromagnetic waves carrying radio frequency energy between a transmitting device and a receiving device. Its importance in communications lies in the knowledge of its fundamental parameters, which requires specialised measurement equipment and laboratory instruments to make important decisions on the coupling of technologies in data transmission systems.

Methodology: To do so, a hardware and software architecture is created and implemented using analogue inputs to measure attenuation and digital and timed interruptions to measure the delay between the incident and transmitted waves, whose data are used to calculate characteristic impedance, attenuation constant, phase constant, propagation speed, resistance, conductance, capacitance and inductance, by means of experimental equations. Four experiments are carried out using 305 meters of coaxial cable, checking the data obtained with the manufacturer's theoretical data and validating with measurements of specialised specialized electronic instrumentation equipment, such as the function generator and the digital oscilloscope, with the aim of finding out the error of the proposed tool designed compared to advanced instruments.

Results: As a result, a device is built that calculates the basic parameters of a transmission line with an error between 3% and 9% in the measurements.

Conclusions: The developed tool delivers results close to the theoretical values and when compared with electronic measurement instruments (digital oscilloscope and function generator), it measures the characteristic impedance accurately; it presents a percentage error of 3.7% when measuring the phase constant; and finally, it presents a percentage error of less than 9% when measuring the attenuation constant, delay, propagation speed, resistance, conductance, capacitance and inductance. This determines that the maximum error of the measurements is 8.98%, demonstrating that the proposed device developed is suitable for measuring the parameters of transmission lines.

Funding: University of Pamplona.

Keywords: arduino, transmission lines, measurement systems, embedded systems, telecommunications.

Tabla de Contenidos

	Página
Introducción	100
Metodología	102
Creación del sistema	102
Implementación del sistema	102
Pruebas del sistema	105
Resultados	106
Creación e implementación de la arquitectura	106
Pruebas del sistema	108
Conclusiones	111
Referencias	112

INTRODUCCIÓN

En la ingeniería electrónica, los conductores, o también denominados *líneas de transmisión* (LT), son uno de los principales elementos de los sistemas electrónicos y de telecomunicaciones que tienen la función de transmitir señales entre dispositivos o componentes (Costa *et al.*, 2017). Por tanto, es necesario conocer los parámetros principales de las LT, ya que al realizar diseños de estos sistemas se debe considerar las pérdidas debido a longitud, frecuencia y acoplamientos; los parámetros principales de las LT, que son las constantes de atenuación y de fase; la velocidad de propagación de la onda, la resistencia, conductancia, capacitancia e inductancia por metro; finalmente, la impedancia característica. Estas variables se pueden representar por medio de los parámetros S (dispersión) y T (redes de dos puertos) (Cheng *et al.*, 1997, Hayt *et al.*, 2006, Neri Vela, 1999, Sadiku, 2003, Ulaby, 2017). Aunque existen herramientas para la medición de los parámetros de las LT, estas presentan un gran costo al momento de su compra, cuidado y mantenimiento.

Actualmente, para los investigadores es importante determinar los parámetros de las LT; en este caso, Manfredi *et al.* (2016) usan una técnica de perturbaciones adaptativas para realizar el análisis de las LT no uniformes, desarrollan un algoritmo para resolver las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de la línea de una forma estándar.

De igual forma, Jing *et al.* (2018) muestran un método para determinar perfiles de los parámetros de impedancia y conductividad de una LT con pérdidas, utilizan mediciones de pérdidas de retorno y de transmisión de ambos extremos de la LT para proceder con la demostración de los resultados por medio de simulación y de experimentos con varias configuraciones.

En la investigación de [Rabaani et al. \(2019\)](#) se presentan los resultados sobre los coeficientes de transmisión y reflexión en LT no uniformes de alta frecuencia.

Por su parte, [Yin et al. \(2015\)](#) establecen una nueva teoría de perturbación de impedancia basada en el modelo de línea de transmisión agrupada, tanto para las líneas de un solo extremo como para las acopladas, donde la constante de propagación, los parámetros S – relacionados con las ondas de voltaje incidentes y reflejadas–, y los parámetros T –que permiten expresar las relaciones entre las impedancias a partir de los parámetros S–, pueden construirse directamente a partir de un factor de perturbación de impedancia, realizando tres análisis para evaluar la precisión y sensibilidad de la medición mediante la experimentación de resultados.

También, [Liu et al. \(2016\)](#) presentan un método analítico para la LT basado en la teoría de la pequeña reflexión y se puede aplicar al transformador multifrecuencia con un valor de frecuencia arbitrario en un rango determinado, a través de la realización de pruebas de desarrollo de cálculos y simulaciones.

Finalmente, [Chabane et al. \(2017\)](#) plantean una teoría de línea de transmisión mejorada, donde sus ecuaciones constitutivas se derivan directamente de las ecuaciones de Maxwell, sin la restricción del modo electromagnético transversal, conservando al mismo tiempo el formalismo matemático de la teoría clásica de la línea de transmisión, desarrollando ecuaciones que pueden ser fácilmente resueltas por los solucionadores clásicos existentes. Una tendencia futura son las redes inteligentes, como lo analizan [Giral et al. \(2017\)](#), donde se identifican las principales características y la digitalización de las LT, como un factor determinante en el uso de diferentes dispositivos embebidos que se comunican en red y que requieren del estudio de parámetros eléctricos para llegar a la automatización del sistema eléctrico colombiano.

A partir de lo anterior, el grueso de las investigaciones se concentra en determinar analítica y matemáticamente los parámetros de las LT y realizar su comprobación mediante experimentos y simulaciones ([Reynoso et al., 2020](#), [Shlivinski y Hadad, 2018](#)); sin embargo, es necesario desarrollar estudios que diseñen e implementen herramientas y equipos que puedan estimar el diagnóstico y fallas de los parámetros de forma simple y sencilla ([Asprou et al., 2019](#), [Chen et al., 2018](#)). Esta tarea puede ser desarrollada por los sistemas embebidos, que se usan en aplicaciones específicas y permiten obtener un buen rendimiento con sistemas de bajo costo computacional ([Parada et al., 2016](#)) y menos componentes que el uso de computadoras o equipos de propósito general ([Manfredi et al. \(2016\)](#), [Xue et al., 2020](#)).

Por tanto, en esta investigación, se desarrolla una herramienta para la caracterización de una línea de transmisión con sistemas embebidos, la cual representa un aporte importante en el escenario de las ciudades inteligentes y lo concerniente a la constante necesidad de monitorear variables en todos los subsistemas de la ciudad, específicamente en el concepto de redes eléctricas inteligentes. Para ello se crea la arquitectura del sistema a través de la determinación de unos requerimientos mínimos y de la presentación de un diseño funcional de esta; se implementa la arquitectura mediante el *software* necesario para cumplir con las exigencias del análisis requerido, y se prueba el sistema que contraste

los resultados con equipos de medida de laboratorio para inferir conclusiones.

METODOLOGÍA

La validación de la investigación tiene un sentido praxiológico cuando los conceptos se fundamentan en la construcción de las acciones por medio de la experimentación, de acuerdo con la comprobación de Gallego *et al.* (2020), por medio de un modelo guiado para diseñar rutas y metodologías en el abordaje de la formulación y resolución de problemas de ingeniería. En este sentido, la figura 1 ilustra la metodología implementada en sus diferentes fases y etapas, las cuales se definen y desarrollan desde el concepto de sistema embebido, según Ashford-Lee y Arunkumar-Seshia (2017); Noergaard (2005), y Zurawski (2018).

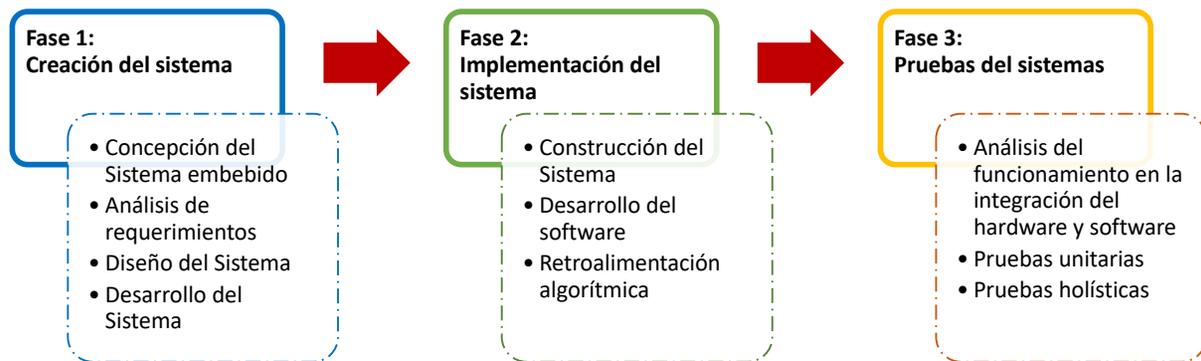


Figura 1. Metodología para el desarrollo del sistema

Fuente: elaboración propia.

Creación del sistema

El propósito de esta fase es tener el diseño de *hardware* y *software* del sistema para la caracterización de una línea de transmisión en sus parámetros fundamentales: constante de atenuación y de fase; resistencia, conductancia, capacitancia e inductancia por metro; velocidad de propagación de la onda e impedancia característica. La tabla 1 muestra las características de interés del sistema embebido seleccionado.

Implementación del sistema

Esta fase tiene como propósito codificar los algoritmos de funcionamiento, que son implementados en la placa de desarrollo Arduino identificada como sistema embebido, para el cálculo de los parámetros en la línea de transmisión y la integración tecnológica del sistema. Además, en esta fase

Tabla 1. Características del sistema embebido: Arduino Pro Mini

Característica	Descripción
Microcontrolador	ATmega 328p
Voltaje operativo	3,3 V
Corriente máxima de salida	150 mA
Pines de entrada/salida digital	14 pines
Pines PWM	6 pines
Pines de entrada analógicos	6 pines
Memoria Flash	32 kB
Memoria SRAM	1 kB
Velocidad de reloj	8 MHz
Dimensiones	18 x 33 mm
Peso	2 gr
Precio	COP \$13.000

Fuente: elaboración propia.

se aplican las ecuaciones (1), (2), (3), (4), (5), (6) y (7), para el cálculo experimental de los parámetros necesarios en la caracterización de la línea de transmisión de la siguiente manera: constante de atenuación, constante de fase, velocidad de propagación de la onda, resistencia, conductancia, capacitancia e inductancia por metro; mediante las ecuaciones.

$$\alpha = \frac{20}{l} \log \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \quad (1)$$

Donde:

α es la constante de atenuación de la línea de transmisión en decibeles por metro (dB/m).

l es la longitud de la línea de transmisión en metros (m).

V_{out} es el voltaje de la onda transmitida en voltios (V).

V_{in} es el voltaje de la onda incidente en voltios (V).

$$\beta = \frac{2\pi \cdot f \cdot r}{l} \quad (2)$$

Donde:

β es la constante de fase de la línea de transmisión en radianes por metro (rad/m).

f es la frecuencia de la onda incidente en *hertz* (Hz).

r es el retardo medido entre las ondas incidente y transmitida en segundos (s).

l es la longitud de la línea de transmisión en metros (m).

$$v_p(c) = \frac{l}{r \cdot c} \quad (3)$$

Donde:

$v_p(c)$ es la velocidad de propagación de la onda en términos de la velocidad de la luz.

l es la longitud de la línea de transmisión en metros (m).

r es el retardo medido entre la onda incidente y la onda transmitida en segundos (s).

c es la velocidad de la luz en metros por segundo (m/s).

$$R = \frac{Z_{in}}{l} \quad (4)$$

Donde:

R es la resistencia de la línea de transmisión en ohmios por metro (Ω/m).

Z_{in} es la impedancia de entrada de la línea de transmisión en ohmios (Ω).

l es la longitud de la línea de transmisión en metros (m).

$$G = \frac{1}{R} \quad (5)$$

Donde:

G es la conductancia de la línea de transmisión en Siemens por metro (S/m).

R es la resistencia de la línea de transmisión en ohmios por metro (Ω/m).

$$C = \frac{1}{v_p \cdot Z_0} \quad (6)$$

Donde:

C es la capacitancia de la línea de transmisión en faradios por metro (F/m).

v_p es la velocidad de propagación de la onda en metros por segundo (m/s), $v_p = l/r$.

Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión en ohmios (Ω).

$$L = \frac{Z_0}{v_p} \quad (7)$$

Donde:

L es la inductancia de la línea de transmisión en henrios por metro (H/m).

Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión en ohmios (Ω).

v_p es la velocidad de propagación de la onda en metros por segundo (m/s), $v_p = l/r$.

Para el cálculo experimental de la impedancia característica se usa un potenciómetro conectado al final de la línea, que se ajusta observando las ondas incidente y reflejada en el osciloscopio hasta

lograr que el coeficiente de reflexión sea cero, condición en la cual se dice que la línea está acoplada y se cumple que la impedancia conectada como carga a la línea de transmisión es la misma que la impedancia característica. Finalmente, se retira el potenciómetro de la línea y se mide con un multímetro su valor.

Pruebas del sistema

Para el desarrollo de las pruebas se realizan cuatro experimentos sobre una línea de transmisión minicoaxial de 305 m de longitud. La tabla 2 relaciona las tecnologías utilizadas en cada experimento, con la finalidad de comparar los resultados del sistema con equipos de laboratorio.

Tabla 2. Experimentos propuestos para el desarrollo y prueba del sistema

Experimento	Generación de PWM	Lectura de señal
1	Generador de funciones SG2120 DDS	Osciloscopio digital ADS1102CML
2	Arduino Pro Mini	Osciloscopio digital ADS1102CML
3	Generador de funciones SG2120 DDS	Arduino Pro Mini
4	Arduino Pro Mini	Arduino Pro Mini

Fuente: elaboración propia.

En términos generales, los experimentos consisten en inyectar un pulso PWM de 100 kHz con un ciclo de trabajo del 10%; esto, debido a que en diferentes pruebas se caracterizó en frecuencia la placa Arduino Pro Mini, y la señal cuadrada de mayor frecuencia que puede leer sin errores es de 100 kHz con un ciclo de trabajo mínimo sin alteraciones del 10%. Estas características de la onda son necesarias para que las ondas incidente, reflejada y transmitida no se superpongan entre sí y sea posible la medición de los flancos de subida y la amplitud de cada una de ellas sin interferencias.

La figura 2 diferencia estas ondas en una visualización desde el osciloscopio digital, además identifica los eventos importantes en el proceso de medición y muestra las ondas después del acople de impedancias para proceder a una correcta toma de datos. La diferencia temporal de ocurrencia de los flancos de subida de las ondas incidente y transmitida determinan el retardo; así mismo, la diferencia de amplitudes refleja la atenuación; afectaciones que se presentan por la propagación de la onda en la línea de transmisión.

Los datos medidos con el sistema embebido son comparados con instrumentos especializados para tener un referente, considerando las especificaciones técnicas determinadas por Lapp ? para el cable coaxial.

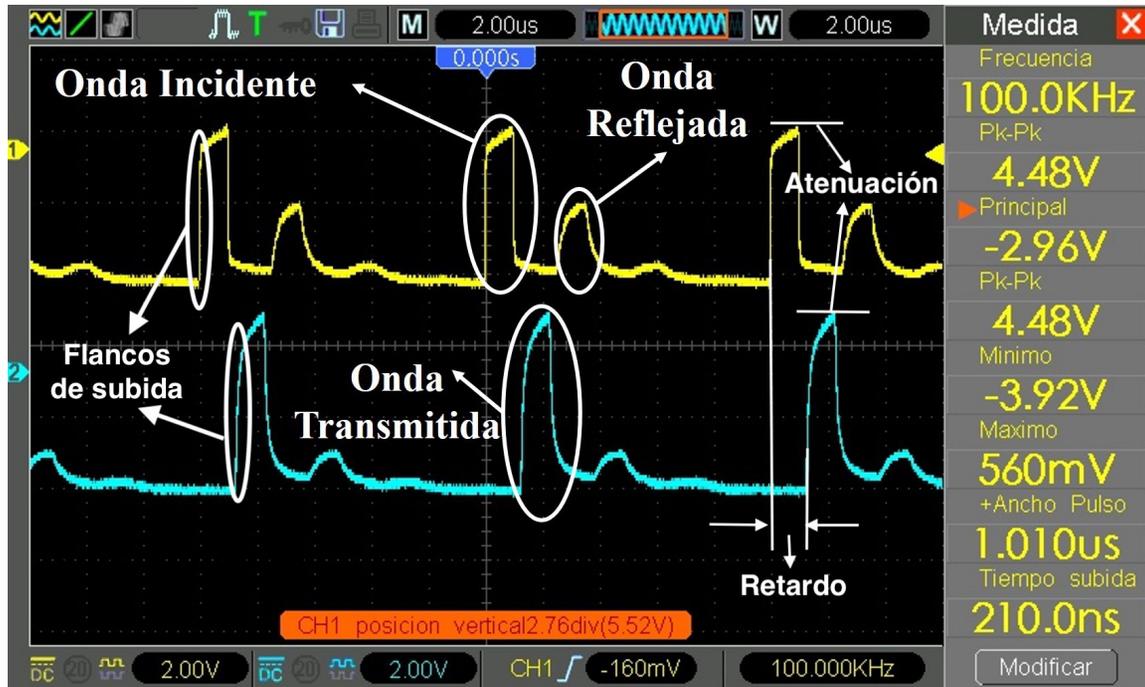


Figura 2. Ondas incidente, reflejada y transmitida, en la línea de transmisión coaxial con identificación de flancos, retardo y atenuación

Nota: tomada experimentalmente con el osciloscopio digital ADS1102CML.

Fuente: tomada experimentalmente con el osciloscopio digital ADS1102CML.

RESULTADOS

Este apartado se estructura con base en la metodología de la figura 1, presenta los resultados del procesamiento de la caracterización de una línea de transmisión en sus parámetros fundamentales y expone su análisis.

Creación e implementación de la arquitectura

La figura 3 muestra la arquitectura del *hardware* desarrollado, en un bosquejo de dos módulos: el generador y el medidor.

El módulo generador es usado para la inyección del pulso PWM con un ciclo de trabajo del 10 % a 100 kHz; este cuenta con dos pulsadores para enviar y detener la onda incidente y un acondicionamiento de señal basado en un amplificador TL071 con ganancia de voltaje experimental de 2 V para compensar las pérdidas por atenuación en la línea de transmisión y por el acople de la línea con la tarjeta Arduino, lo que garantiza un nivel de señal en las ondas incidentes y transmitidas mínimo de 3,3 V para una lectura correcta por parte del sistema.

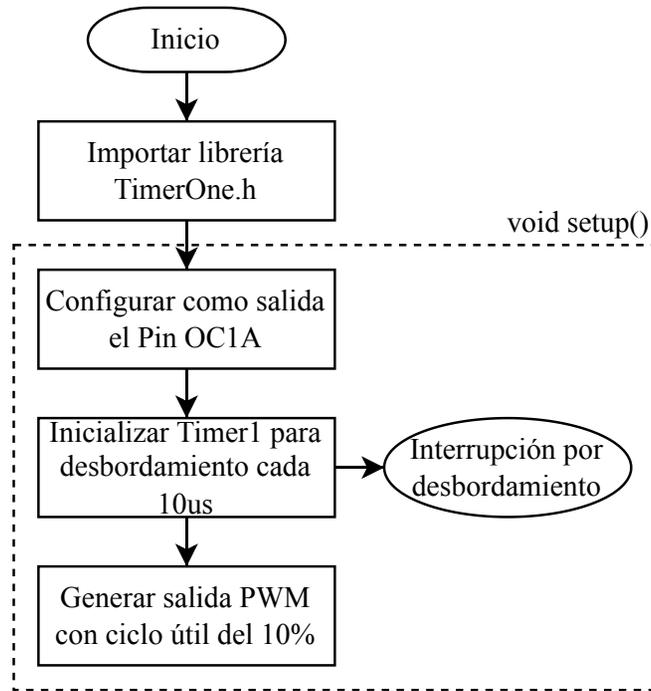


Figura 4. Diagrama de flujo del módulo generador

Fuente: elaboración propia.

ta del *Timer1* en el instante en que ocurre el evento del flanco de subida de la onda incidente, deshabilita la interrupción de ésta y habilita la interrupción de la onda transmitida, ejecutando a *isr3()* que registra la cuenta del *Timer1* en que ocurre el evento del flanco de subida de la onda transmitida deshabilitando la interrupción de esta, y el ciclo vuelve a comenzar. La función *ISR(TIMER1_OVF_vect)* se ejecuta con cada ciclo de reloj del *Timer1*, con una duración teórica de 62.5 ns, y almacena este dato en la variable *overflowCount* para tener una cuenta adecuada del número de ciclos ocurridos y, así, calcular el valor del retardo en una unidad de tiempo.

Pruebas del sistema

La figura 6 muestra la conexión física propuesta de los cuatro experimentos descritos en la tabla 2.

El primer experimento consiste en generar la onda incidente con el generador de funciones y leer los datos experimentales con el osciloscopio digital, mediante el cálculo de los parámetros por observación de forma manual.

El segundo experimento busca generar la onda incidente con la placa de desarrollo Arduino y leer los datos experimentales con el osciloscopio digital, a través del cálculo de los parámetros por observación de forma manual.

El tercer experimento busca generar la onda incidente con el generador de funciones y leer los

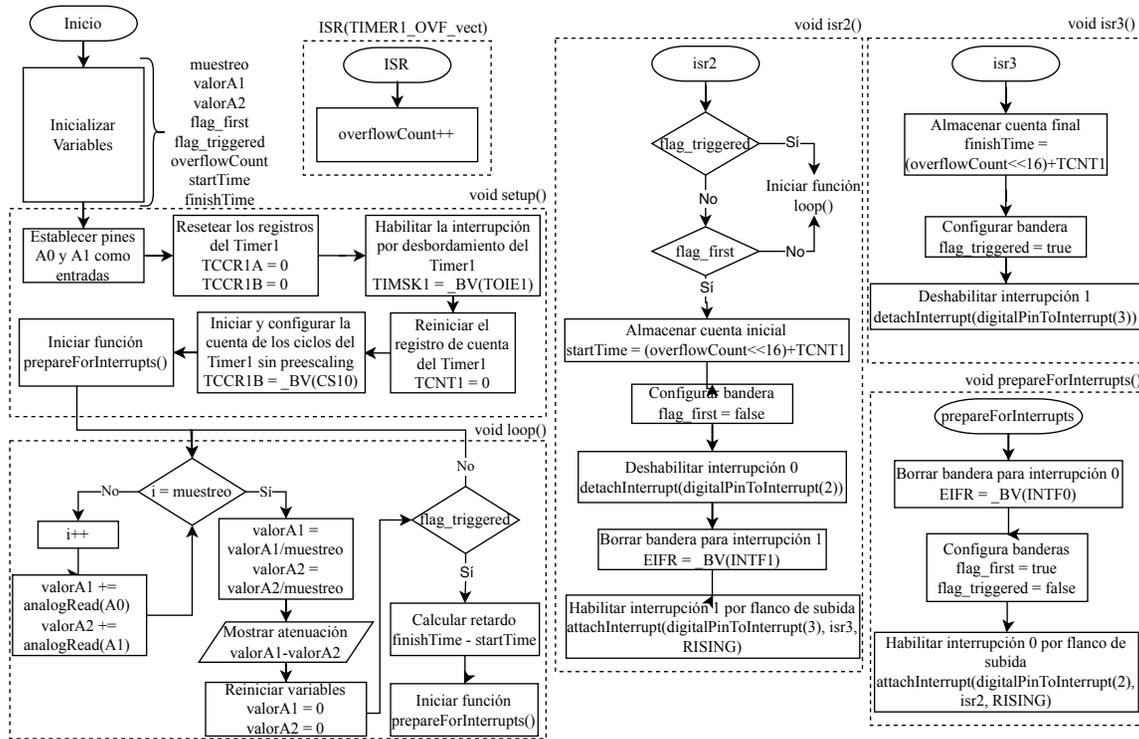


Figura 5. Diagrama de flujo del software para el módulo medidor

Fuente: elaboración propia.

datos experimentales con la placa de desarrollo Arduino, al realizar el cálculo de los parámetros de forma automática.

Finalmente, el cuarto experimento consiste en generar la onda incidente y leer los datos experimentales, con el uso de una placa de desarrollo Arduino. Este último ensayo constituye el sistema de medición de parámetros fundamentales de una línea de transmisión basado en sistemas embebidos, por lo que sus resultados son los de mayor relevancia en este artículo.

En la tabla 3 se presenta una comparación entre los datos de la hoja de especificaciones de la línea, los cálculos teóricos basados en las especificaciones de fabricación de esta y los cálculos experimentales obtenidos en cada experimento; aquí se relaciona el error porcentual absoluto entre los experimentos 1 y 4, dado que representan la comparación objetivo de este trabajo. Los parámetros del cable coaxial utilizado para las pruebas se toman como referentes en cada uno de los experimentos para validar el procedimiento de cálculo propuesto; estos datos fueron tomados de la hoja de especificaciones publicada por la empresa Lapp Tannehill (2019).

Por último, la tabla 4 muestra una comparativa económica del sistema construido frente a los equipos de laboratorio tradicionales utilizados en la validación de las mediciones experimentales.

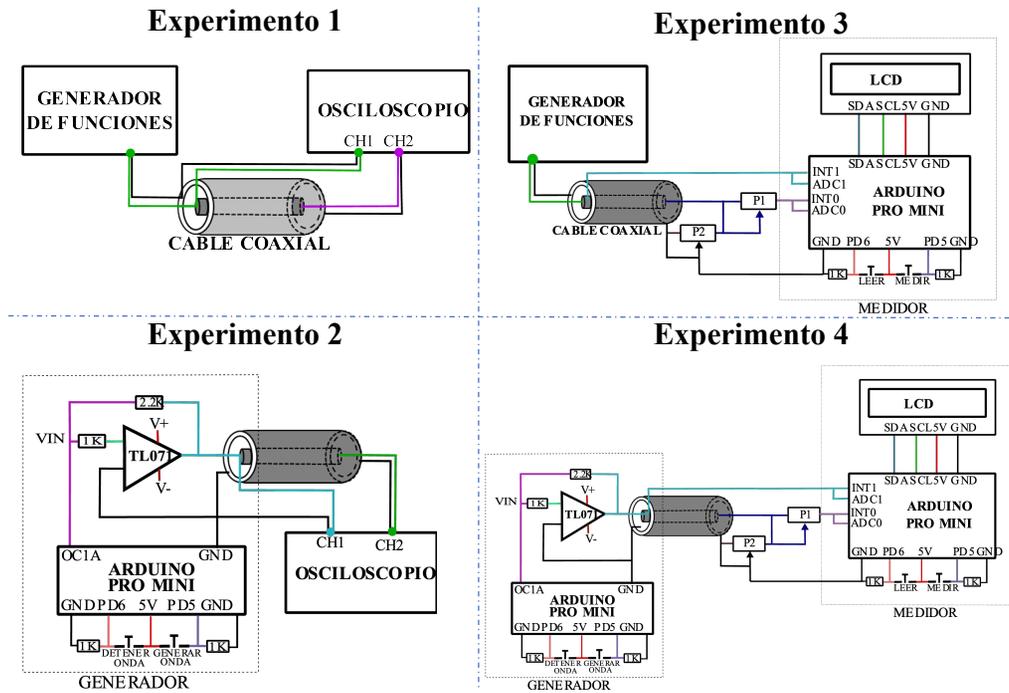


Figura 6. Diagrama de conexiones para los experimentos propuestos

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Comparativa de resultados obtenidos en la caracterización de la línea de transmisión

Parámetro	Valor		Experimento				% de error
	Nominal	Teórico	1	2	3	4	
$Z_0(\Omega)$	75	75	74,3	74	74,2	74,3	0
$\alpha(\text{dB/m})$	0,02	0,0197	0,0138	0,015	0,02	0,0148	7,5
$r(\mu\text{s})$	1,3	1,3	1,3	1,4	1,44	1,38	6,15
$\beta(\text{rad/m})$	0,00265	0,0027	0,0027	0,0029	0,003	0,0028	3,7
$v_p(\text{m/s})$	0,78c	0,78c	0,78c	0,73c	0,71c	0,74c	5,13
$R(\Omega/\text{m})$	0,146	0,146	0,141	0,17	0,148	0,149	5,68
$G(\text{S/m})$	7,38	6,85	7,1	5,88	6,74	6,73	5,22
$C(\text{pF/m})$	56,78	56,76	56,48	62	63,63	60,9	7,83
$L(\mu\text{H/m})$	0,318	0,318	0,312	0,34	0,35	0,34	8,98

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Comparativa económica entre el sistema propuesto y los equipos de laboratorio

Costos del sistema propuesto (COP)		Costos de los equipos de laboratorio (COP)	
2 Arduino Pro Mini	26.000	Generador de funciones SG2120 DDS	1.170.000
6 resistencias	1200		
2 potenciómetros	1600		
1 TL071	5800	Osciloscopio digital ADS1102CML	1.790.000
1 LCD 16x2	13.000		
4 pulsadores	1000		
Total	48.600	Total	2.960.000

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Con una herramienta de identificación de los parámetros de las líneas de transmisión se pueden predecir las posibles pérdidas y problemas que se presentan cuando las ondas electromagnéticas viajan por el medio físico, del cual se debe considerar las posibles asimetrías y el desacople de impedancias en su estructura físicas, que seguramente causan errores y por ende desperdicio de energía.

De ahí que, con sistemas embebidos modernos, se facilita la medición experimental de dichos parámetros mediante la comprobación de su funcionamiento con la revisión de los datos teóricos y los del fabricante, y de forma directa y en campo con la validación de los mismos, por medio equipos de instrumentación electrónica, que para el caso de estudio, se utilizaron el generador de señales y el osciloscopio digital.

Con la herramienta desarrollada se infiere que los resultados son cercanos a los valores teóricos y que, al compararse con los instrumentos de medición electrónica (osciloscopio digital y generador de funciones), mide de forma exacta la impedancia característica; presenta un error porcentual del 3,7% cuando mide la constante de fase; y registra un error porcentual menor del 9% cuando mide constante de atenuación, retardo, velocidad de propagación, resistencia, conductancia, capacitancia e inductancia. Lo anterior determina que el error máximo de las mediciones es 8,98%, lo que indica que el dispositivo desarrollado es adecuado para la medición de los parámetros de las líneas de transmisión.

La integración entre el algoritmo de *software* con el prototipo de *hardware* permite comprobar la medición de los parámetros de forma sistemática y confiable, sin necesidad de utilizar equipos de laboratorios costosos; esto garantiza el proceso del aprendizaje del comportamiento y funcionamiento de los parámetros eléctricos en un medio de transmisión de forma práctica, mediante la ejecución de

pruebas analíticas y correcciones en el algoritmo matemático, como se pudo evidenciar con la tabla 3.

Se observó que el cable se comporta como una cavidad resonante al realizar la calibración de los pulsos que están representados como las ondas incidente y reflejada para calcular la duración del retardo de la señal al variar la resistencia del potenciómetro. Esta situación puede generar un error de incertidumbre en la medición (como también la calibración de los equipos de laboratorio); pero, al comparar con las medidas en un ambiente controlado, es posible tener resultados favorables si se realizan más mediciones en campo.

Los costos de la herramienta desarrollada equivalen al 2 % de las herramientas de laboratorios, como el osciloscopio y el generador de señales; esto permite considerar el sistema propuesto como una opción económica para la detección de fallas en LT de redes inteligentes.

REFERENCIAS

- [Ashford-Lee y Arunkumar-Seshia (2017)] Ashford-Lee, E. y Arunkumar-Seshia, S. (2017). *Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach*. MIT Press. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2867966> ↑Ver página 102
- [Asprou *et al.*, 2019] Asprou, M., Kyriakides, E. y Albu, M. M. (2019). Uncertainty bounds of transmission line parameters estimated from synchronized measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(8), 2808-2818. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2867966> ↑Ver página 101
- [Costa *et al.*, 2017] Costa, F., Borgese, M., Degiorgi, M. y Monorchio, A. (2017). Electromagnetic characterisation of materials by using transmission/reflection (T/R) devices. *Electronics*, 6(4), 95. <https://doi.org/10.3390/electronics6040095> ↑Ver página 100
- [Chabane *et al.* (2017)] Chabane, S., Besnier, P. y Klingler, M. (2017). A modified enhanced transmission line theory applied to multiconductor transmission lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 59(2), 518-528. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2016.2611672> ↑Ver página 101
- [Cheng *et al.*, 1997] Cheng, D. K. (1997). *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. 1.^a ed. Pearson Educación. ↑Ver página 100
- [Chen *et al.*, 2018] Chen, Y. Q., Fink, O. y Sansavini, G. (2018). Combined fault location and classification for power transmission lines fault diagnosis with integrated feature extraction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(1), 561-569. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2721922>. ↑Ver página 101

- [Gallego *et al.* (2020)] Gallego, A., Bustos, E. y Reyes, J. (2020). Guided models for teaching students research in science and engineering. *Tecnura*, 24(66), 85-94. <https://doi.org/10.14483/22487638.16133> ↑Ver página 102
- [Giral *et al.* (2017)] Giral, W., Celedón, H., Galvis, E. y Zona, Á. (2017). Redes inteligentes en el sistema eléctrico colombiano: revisión de tema. *Tecnura*, 21(53), 119-137. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.3.a08>. ↑Ver página 101
- [Hayt *et al.*, 2006] Hayt, W. H. y Buck, J. A. (2006). *Teoría electromagnética*. McGraw-Hill/Interamérica. ↑Ver página 100
- [Jing *et al.* (2018)] Jing, L., Wang, W., Li, Z. y Murch, R. D. (2018). Detecting impedance and shunt conductance faults in lossy transmission lines. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(7), 3678-3689. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2829812> ↑Ver página 100
- [Lapp Tannehill (2019)] Lapp Tannehill (2019). *Coaxial Cable*. <https://www.lapptannehill.com/wire-cable/coaxial-cable>. ↑Ver página 109
- [Liu *et al.* (2016)] Liu, L., Geng, J., Liu, F., Fan, H., Liang, X., Wang, W. y Jin, R. (2016). A novel analytical method for multi-frequency transmission line transformer. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 26(8), 556-558. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2016.2585555> ↑Ver página 101
- [Manfredi *et al.* (2016)] Manfredi, P., De Zutter, D. y Ginste, D. V. (2016). Analysis of nonuniform transmission lines with an iterative and adaptive perturbation technique. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 58(3), 859-867. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2016.2523604> ↑Ver página 100, 101
- [Neri Vela, 1999] Neri Vela, R. (1999). *Líneas de transmisión*. 1.^a ed. McGraw-Hill. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.1999.01n2.009> ↑Ver página 100
- [Noergaard (2005)] Noergaard, T. (2005). *Embedded systems architecture: A comprehensive guide for engineers and programmers*. Elsevier Inc. ↑Ver página 102
- [Parada *et al.*, 2016] Parada, E., Illera, M., Sepúlveda, S., Guevara, D. y Medina, B. (2016). Sistema de control domótico de bajo costo: un respaldo a la generación ecológica de energía eléctrica en Colombia. *Tecnura*, 20(49), 120-132. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a08> ↑Ver página 101
- [Rabaani *et al.* (2019)] Rabaani, K., Added, M., Boulejfen, N., Kouki, A. y Ghanounichi, F. (2019). Frequency domain analysis of periodic non uniform substrate integrated waveguide transmission lines. En *2019 IEEE 19th Mediterranean Microwave Symposium 2019* (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1109/MMS48040.2019.9157270> ↑Ver página 101

- [Reynoso *et al.*, 2020] Reynoso, J., Apolar, M. A., Pulido, R., Cuesta, J., Loo, R. y Maya, D. C. (2020). Transmission line impedance characterization using an uncalibrated vector network analyzer. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 30(5), 528-530. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.2984377> ↑Ver página 101
- [Sadiku, 2003] Sadiku, M. N. O. (2003). *Elementos de electromagnetismo*. 3.^a ed. Oxford. ↑Ver página 100
- [Shlivinski y Hadad, 2018] Shlivinski, A. y Hadad, Y. (2018). Beyond the Bode-Fano bound: Wide-band impedance matching for short pulses using temporal switching of transmission-line parameters. *Physical Review Letters*, 121(20), 204301. 1 <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.204301> ↑Ver página 101
- [Ulaby, 2017] Ulaby, F. T. (2007). *Fundamentos de aplicaciones en electromagnetismo*. Pearson Educación. ↑Ver página 100
- [Xue *et al.*, 2020] Xue, A., Xu, F., Martin, K. E., You, H., Xu, J., Wang, L. y Wei, G. (2020). Robust identification method for transmission line parameters that considers PMU phase angle error. *IEEE Access*, 8, 86962-86971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992247> ↑Ver página 101
- [Yin *et al.* (2015)] Yin, G., Cai, X. D., Secker, D., Ortiz, M., Cline, J. y Vaidyanath, A. (2015). Impedance perturbation theory for coupled uniform transmission lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 57(2), 299-308. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2014.2377050> ↑Ver página 101
- [Zurawski (2018)] Zurawski, R. (2018). *Embedded systems handbook*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315218281> ↑Ver página 102



Optimal Synthesis of a Four-Bar Mechanism for the Knee Using Natural Coordinates for Kinematic Formulation

Síntesis óptima de un mecanismo de cuatro barras para la rodilla utilizando coordenadas naturales para la formulación cinemática

Elkin Gregorio Flórez-Serrano ¹, Neider Nadid Romero-Núñez ², Yezid Alberto Flórez-Martínez³

Fecha de Recepción: 19 de mayo de 2021

Fecha de Aceptación: 20 de abril de 2022

Cómo citar: Flórez-Serrano., E.G Romero-Núñez., N.N y Flórez-Martínez., Y.A. (2022). Optimal Synthesis of a Four-Bar Mechanism for the Knee Using Natural Coordinates for Kinematic Formulation. *Tecnura*, 26(73), 115-129. <https://doi.org/10.14483/22487638.18031>

Abstract

Objective: This research paper presents the study and simulation of a four-bar mechanism, as well as the implementation of natural coordinates as an alternative and effective method for kinematic analysis.

Methodology: A general method for the optimal synthesis of mechanisms for lower-limb prostheses is developed by implementing intelligent computing tools such as genetic algorithms, with the purpose of reducing study times.

Results: Through biomechanical march studies, dimensional characterization and motion parameters are obtained, such as the CIR of the knee joint, with which a prosthetic model was developed, whose structural mechanical behavior was studied under use conditions by means of the finite element method.

Conclusions: It is evidenced that the prosthesis model fulfills the kinematic requirements and is structurally functional under static and dynamic loads that exceed the nominal values of real loads and evidence safety factors above 7.

Funding: Universidad de Pamplona

Keywords: mechanism, knee, optimal synthesis, biomechanical analysis, kinematics, natural coordinates

¹PhD in Mechanical Engineering, Master's in Mechanical Engineering, Master's in Chemical and Process Engineering, and mechanical engineer. Professor and researcher at Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia.
Email: eflorez@unipamplona.edu.co

²PhD candidate in Mechanical Engineering, Master's in Mechanical Engineering, and mechanical engineer. Doctoral student at Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brazil.
Email: neider.romero@posgrad.ufsc.br

³Mechanical engineer. Student of the Mechanical Engineering program of Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
Email: yezidaflorez@hotmail.com

Resumen

Objetivo: Este trabajo de investigación presenta el estudio y la simulación de un mecanismo de cuatro barras, así como la implementación de las coordenadas naturales como método alternativo y efectivo para el análisis cinemático.

Metodología: Se desarrolla un método general para la síntesis óptima de mecanismos para prótesis de miembro inferior mediante la implementación de herramientas de computación inteligente como los algoritmos genéticos, con el fin de reducir los tiempos de estudio.

Resultados: Mediante estudios biomecánicos de la marcha, se obtuvieron la caracterización dimensional y parámetros de movimiento como el CIR de la articulación de la rodilla, con lo cual se desarrolló un modelo protésico, cuyo comportamiento mecánico estructural se estudió en condiciones de uso mediante el método de elementos finitos.

Conclusiones: Se evidencia que el modelo de la prótesis cumple con los requisitos cinemáticos y es estructuralmente funcional bajo cargas estáticas y dinámicas que superan los valores nominales de carga real y evidencian factores de seguridad superiores a 7.

Financiamiento: Universidad de Pamplona

Palabras clave: mecanismo, rodilla, síntesis óptima, análisis biomecánico, cinemática, coordenadas naturales

Table of Contents

	Page
Introduction	117
Experimentation and modeling	117
Natural coordinate modeling	117
Biomechanical study	120
Variable identification	121
Results	122
Engineering data	123
Model	124
Load configuration	124
Solution	124
Parameterization	125
Total deformation	125
Equivalent effort (Von Mises)	126
Conclusions	127
Funding	127
Acknowledgments	127
References	127

INTRODUCTION

Transfemoral amputation in Colombia is a problem caused mainly by work or traffic accidents, diseases, and war (Cárdenas *et al.*, 2016, Luengas & Penagos-Marcelo, 2017, Parkin, 2016). Regardless of the cause, unilateral lower limb amputation is classified as transfemoral (above the knee) and transtibial (below the knee) according to the amputation height (Edelstein & Moroz, 2011). The loss of a limb restricts the functionality and natural capacity of the human body to interact with its environment, but the amputation of a lower limb severely impairs gait, which hinders locomotion and the development of people's daily activities (Amador *et al.*, 2011, Ocampo *et al.*, 2010). With amputation, not only are the body segments and joints lost, but also years of training, the parameters that define a person's walking style, and, most importantly, the ability to move freely at different speeds (Martínez, 2013). Therefore, it is necessary to implement mechanical elements or mechanisms that replicate movements and can replace an affected part of the human body. It is within this context that the use of the mechanisms provides a broad solution. Polycentric mechanisms provide researchers with versatility in applications that require monitoring defined trajectories, such as those generated during the walking cycle. One of the main challenges in the application of mechanisms in biomechanics is to define the kinematics and kinetics required, since the mechanism must have the degrees of freedom (movement) and the original restrictions (resistance) of a human joint under normal operating conditions. Specifically, the kinematic analysis of mechanisms is a mathematically complex problem, and, in most cases, only approximate solutions can be obtained. Cases where the geometry of the mechanism is not very complex have analytical solutions, but most of them do not (Avello, 2014, Romero-Núñez & Flórez-Serrano, 2018). In this field, the exact location of the knee joint's center of rotation is of great importance for measuring its kinematics and kinetics. However, no study has yet been able to accurately identify the center of rotation of the knee for several daily activities (Kyungsoo *et al.*, 2015, Titchenal *et al.*, 2017). Therefore, this research includes the study, analysis, and simulation of a four-bar mechanism, as well as the implementation of natural coordinates for analysis. To this effect, the study was carried out in different stages. Initially, a biomechanical study of the lower limb was carried out in order to determine its behavior. Afterwards, the natural coordinates method was implemented, and the optimization process was carried out. The third stage consisted of simulating the prosthesis by means of a virtual prototype.

EXPERIMENTATION AND MODELING

Natural coordinate modeling

Correct modeling of a mechanism must begin with a position analysis. Figure 1 shows the four-bar mechanism to be used throughout the entire process until a model of a knee prosthesis is obtained.

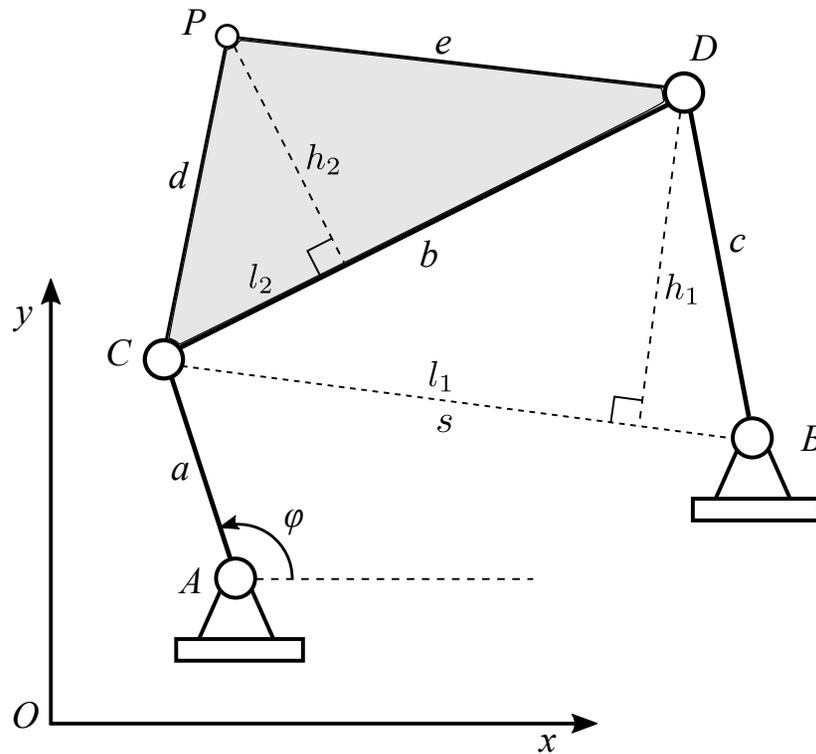


Figure 1. Four-bar mechanism modeling using natural coordinates

Source: Authors.

The figure illustrates the four-bar mechanism, where there is a defined natural coordinate vector \mathbf{q} .

$$\mathbf{q} = [x_c \ y_c \ x_D \ y_D \ x_P \ y_P]^T \quad (1)$$

Since there is only one degree of freedom in this mechanism, the vector of degrees of freedom is written as $\psi = [\varphi]$, which corresponds to an angular coordinate measured from the positive x axis. Six constraint equations are needed, which are described below.

$$\Phi(\mathbf{q}, \varphi) = \begin{bmatrix} (x_C - x_A) - a \sin \varphi \\ (y_C - y_A) - a \cos \varphi \\ (x_D - x_C)^2 + (y_D - y_C)^2 - b^2 \\ (x_D - x_B)^2 + (y_D - y_B)^2 - c^2 \\ (x_P - x_C)^2 + (y_P - y_C)^2 - d^2 \\ (x_P - x_D)^2 + (y_P - y_D)^2 - e^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

The objective is to find an alternative solution to the problem regarding the position of the four-bar mechanism, which is achieved by solving the equations mentioned above, whose problem is reduced by finding the cut-off points between two circumferences, as shown in Figure 2.

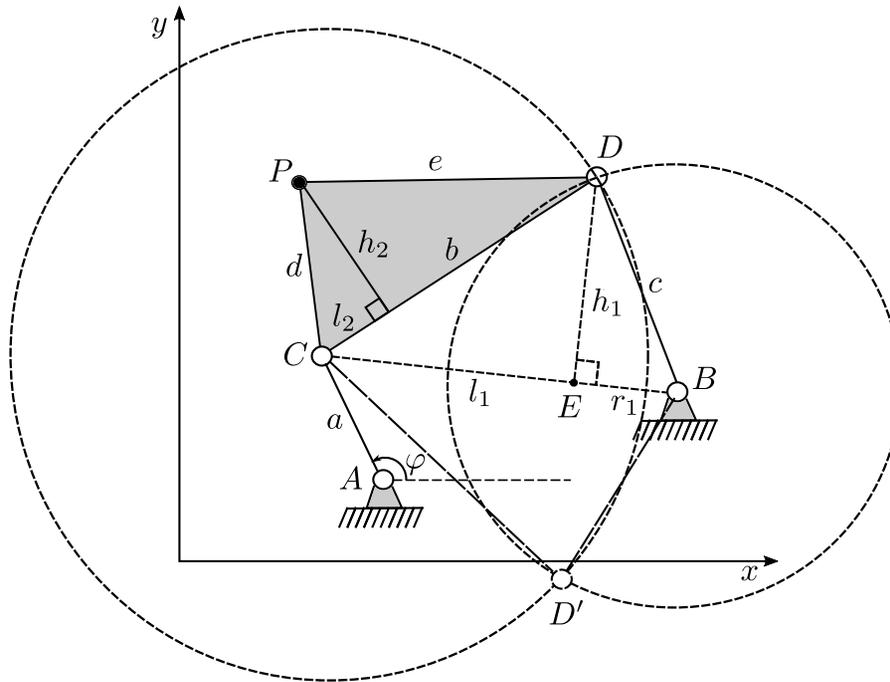


Figure 2. Open and cross-configuration of the four-bar mechanism

Source: [Romero-Núñez, 2016.](#)

The resulting vector of natural coordinates is defined by \mathbf{q} .

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} C \\ D \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ x_D \\ y_D \\ x_D \\ y_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_A + a \cos \varphi \\ y_A + a \sin \varphi \\ x_C + \frac{l_1}{s}(x_B - x_C) + \frac{h_1}{s}(y_C - y_B) \\ y_C + \frac{l_1}{s}(y_B - y_C) + \frac{h_1}{s}(x_C - x_B) \\ x_C + \frac{l_2}{b}(x_D - x_C) + \frac{h_2}{b}(y_C - y_D) \\ y_C + \frac{l_2}{b}(y_D - y_C) + \frac{h_2}{b}(x_C - x_D) \end{bmatrix} \quad (3)$$

To determine the speeds and accelerations of the points of the aforementioned quadrilateral, a substitution of the variables mentioned by [Nikravesh, 2007](#) must be performed. To solve the system of equations, one must have knowledge of the speed of the degrees of freedom (initial velocity).

From the equation, it is concluded that

$$\Phi_{\mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}} = -\Phi_t \quad (4)$$

where $\Phi_{\mathbf{q}}$ is the Jacobian matrix of the restriction equations, $\dot{\mathbf{q}}$ is the vector of speeds to be found, and Φ_t is the partial derivative of the constraint equations with respect to time.

Biomechanical study

Biomechanical analysis allows identifying and defining the variables involved in the gait cycle, such as the speed and acceleration of the different joints and the maximum and minimum angles during the flexion and extension phases. The use of specialized software such as KINOVEA allows observing processes that are imperceptible to the human eye, with which the behavior of the lower limb can be studied (Cáceres-Alvarado & Palacios-Mendoza, 2017). KINOVEA is a free-to-use video annotation tool designed for sport analysis. It features utilities to capture, slow down, compare, annotate, and measure motion in videos.

Figure 3 shows the application of the software for the identification of the reference system used in the study of the patient's gait cycle.

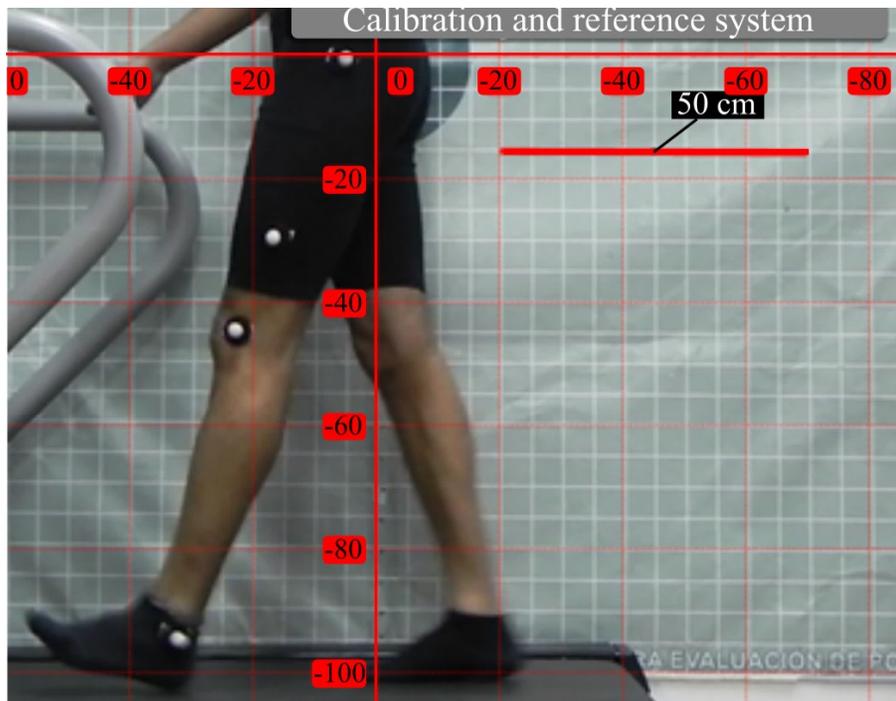


Figure 3. Reference system for the running cycle

Source: Authors.

A starting reference system was created by means of a platform and a grid sailcloth to measure body posture, with the purpose of obtaining more accurate data and establishing a speed of 1,8 km/h. A march study was then conducted on students of the University of Pamplona, during which the different phases of the march were observed as well as changes in the position, velocities, and accelerations of the knee joint through five cycles. The dynamic study of the lower limb began with the determination of the movement ranges of the knee joint, in order to obtain the maximum angles and critical points throughout the different phases (flexion and extension), in addition to the place-

ment of markers at the points necessary for the analysis (greater trochanter, knee, and ankle joint), as shown in Figure 4.

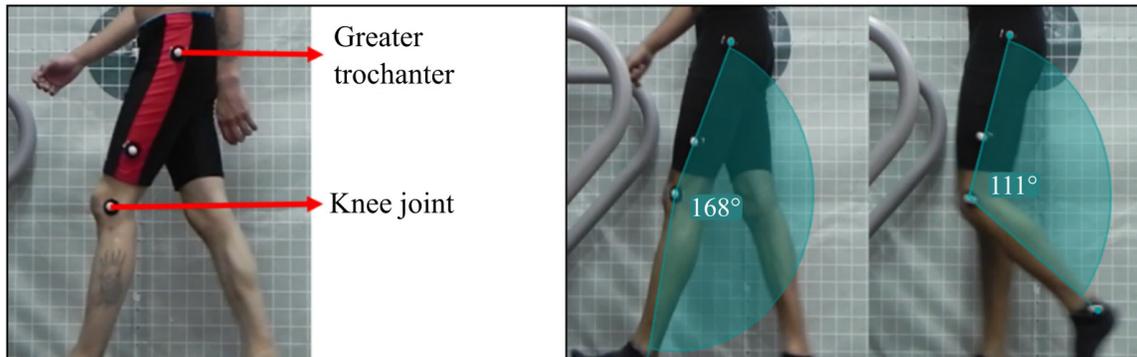


Figure 4. Anatomical points in the study of gait and knee extension and flexion angles

Source: Authors.

Variable identification

Once the markers were placed, the ankle and knee joints were followed in order to obtain the Cartesian coordinates of the ankle joint. Tracking points were used in the balancing phase with the joint as the reference center of the knee. Thanks to the graphic analysis of the videos of the ideal gait cycle, a real approximation of the desired curves was shown to the polycentric mechanism so it could replicate them. In Figure 5a, the ideal center of rotation of the knee is shown. This was done by means of a thorough analysis, in which specific points within the stability zone were defined. The knee changes its center of rotation when there is a variation in the angle of flexion. The points generated by the path made by the ankle joint in the oscillation phase were located, as shown in Figure 5b, thus obtaining the necessary Cartesian coordinates to generate the curves described by the joints. The coordinates in the x and y axes were determined for the previously located points, and, with some small variations in the data, the curves were made as smooth as possible.

Using the experimental data from the points of interest in the lower limb, the trajectory of the studied point of the knee and the trajectory of the ankle in the swing phase of the gait were described, as shown in Figure 6a. After determining these curves, the optimization of the mechanism was carried out by means of a genetic algorithm, from which a mechanism that shows an approximation of the CIR was obtained from a biomechanical analysis, as shown in Figure 6b.

The monitoring of the trajectories generated by the markers allowed identifying the velocity and acceleration of these points (markers) during the five gait cycles studied. The maximum velocity value (Figure 7a) occurs at the beginning of the balancing stage, that is, when the foot is at the midpoint of the oscillation movement. The negative acceleration values (Figure 7b) take place at the moment of contact between the foot and the surface, whereas the maximum values appear when the ankle

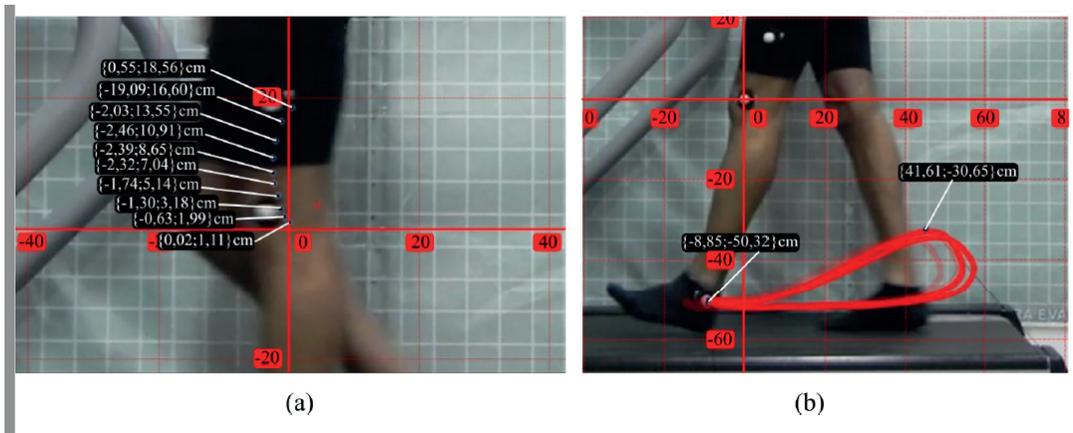


Figure 5. a) Knee CIR, b) ankle tracer

Source: Authors.

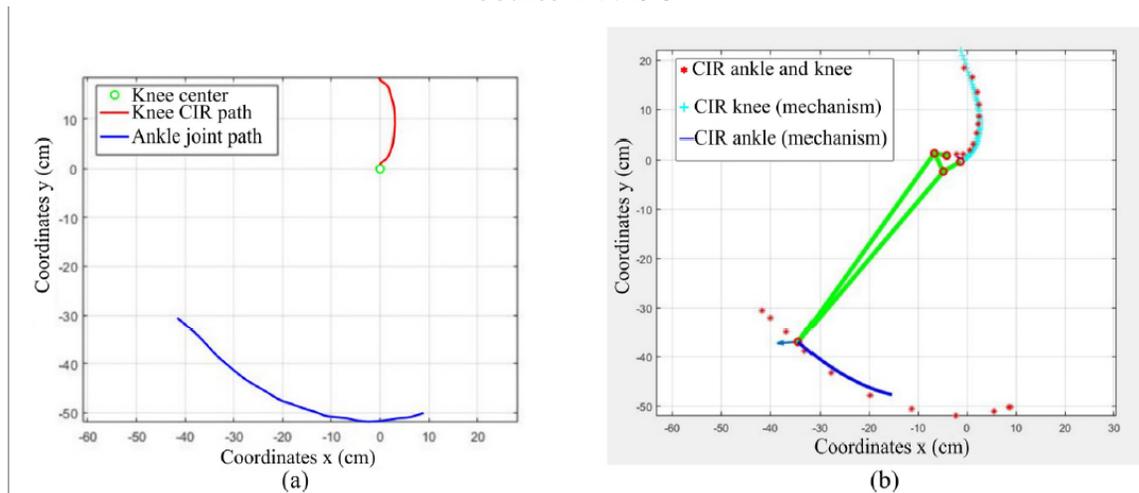


Figure 6. a) Curves described by the CIR of the knee and the ankle joint, b) optimal solution of the mechanism after the optimization process

Source: Authors.

is lifted from the ground, that is, when the walking cycle begins. In addition, in Figure 7, the time at which the joint is subjected to a constant load for a defined period of time (1 s) can be identified: while the lowest part of the limb (heel) is in contact with the ground.

RESULTS

The results of the optimization process allowed obtaining a mechanism with specific characteristics, for which the following link lengths were established: superior link (45,00 mm), inferior link (62,25 mm), curve link (37,50 mm), straight link (60,00 mm). The mechanism proposed for structural

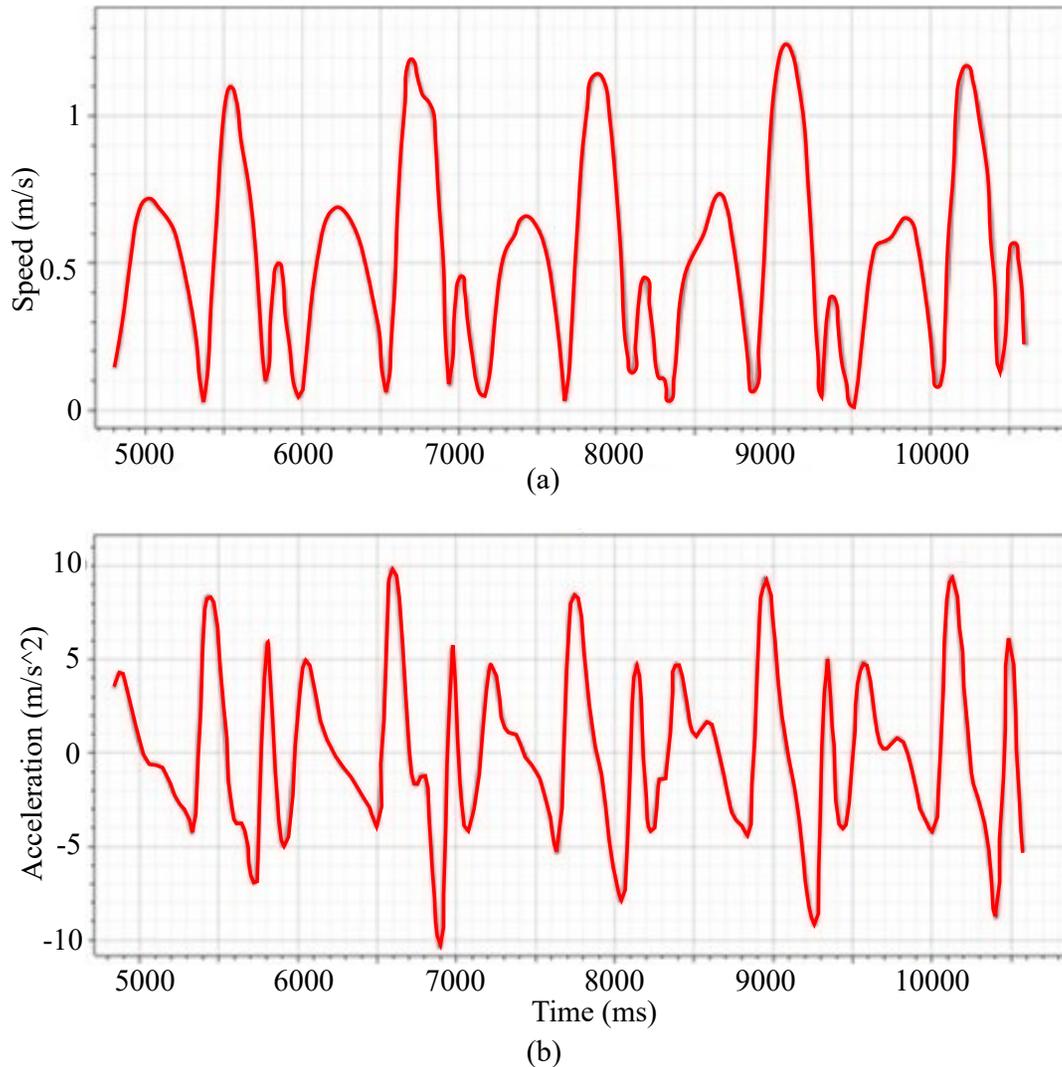


Figure 7. Data of the knee (markers) for five gait cycles: a) velocity and b) acceleration

Source: Authors.

analysis follows the design guidelines presented by [Castro-Valladares, 2012](#). The CAD process was carried out with the help of the SOLIDWORKS 2018-2019 software while respecting the scaled measures. ANSYS was used for structural analysis, which works by modules depending on the system under study.

Engineering data

For the simulation of the polycentric knee mechanism, an aluminum alloy was used for the links and accessories, and 304L stainless steel was employed for the axles. The properties of each material are shown in detail in Table 1.

Table 1. Material properties

Property	Aluminum alloy	Stainless steel 304L
Density (kg/m ³)	2770	7850
Young module (GPa)	71	190
Poisson radius	0,330	0,265
Creep effort (MPa)	280	205
Tensile stress (MPa)	310	510

Source: Authors.

Model

In this stage, the mechanical interface of ANSYS R16 was employed. Initially, the materials were assigned: aluminum alloy and structural steel 304L. Subsequently, the type of contact was defined for each of the faces with node intersections. This was done to approximate the behavior of the assembly as close as possible to the real one. The mesh determination was the result of the metric convergence between the elements. The optimal element size obtained from the simulation was 2 mm, given that, with this configuration, there is a greater number of nodes and elements and the characteristics of the mesh are better than in configurations with a larger average element size.

The next step was meshing the model. A mesh with a form function was configured in order to use the mechanical-physical preference type, the Mechanical APDL solver in iterative mode to find the solution, and tetrahedral elements with an average size of 2 mm, which was obtained from the mesh study shown in Figure 8. The mesh converges to the solution in such a way that the computational time is optimized. The meshing of the piece has defined characteristics to improve the quality of the results, such as a fine relevance center, high smoothing, slow transition, and a fine expansion angle center.

Load configuration

The piece was subjected to a standard gravity of 9,807 m/s². Moreover, in the upper part, a uniformly distributed load of 2.000 N was placed on the upper face, and a position restriction was imposed on the mechanism, which did not allow movement in the other directions.

Solution

For the model analysis, the following relevant solutions were applied:

- Total deformation

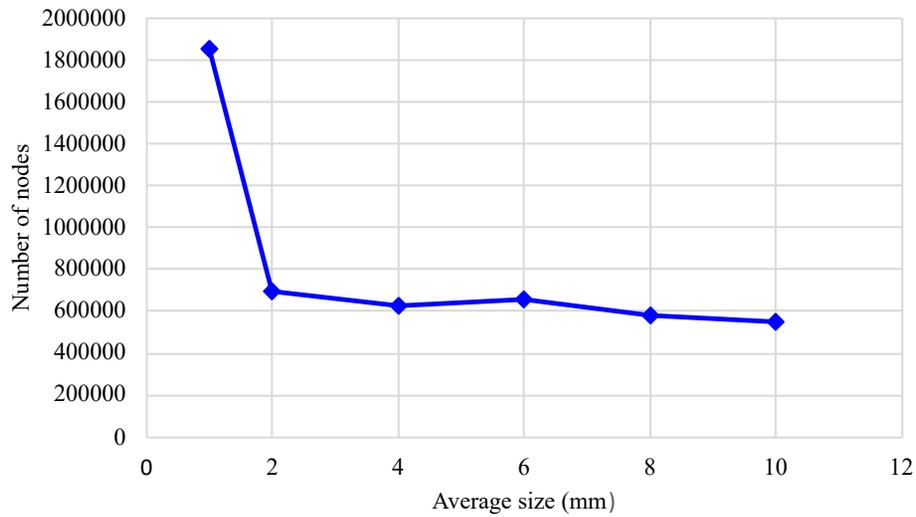


Figure 8. Mesh convergence

Source: Authors.

- Equivalent effort (Von Mises)
- Security factor
- Fatigue factor

The load was parameterized in order to obtain several design points and characterize the behavior of the polycentric knee mechanism. To determine the fatigue behavior the load, the amplitude rate was used, applying the load for a period of 1 s. Additionally, Goodman's theory of failure was defined according to studies conducted in this type of geometry ([Amador et al., 2012](#)).

Parameterization

The results of the parameterization of the load are shown in Table 2. The data show an increase in the values of maximum deformation and equivalent stress, as well as a decrease in the safety and fatigue factors, as the applied load increased.

The results obtained at design point number 3 demonstrate an ability to withstand loads above 2.000 N. Additionally, the structure has a total mass of 1,018 kg.

Total deformation

This section presents the results of the simulation with respect to the total deformation produced in the prosthesis from a point load applied on its upper surface, which simulated two times the weight exerted by an average person. Figure 9a shows the maximum value of the deformation obtained in the simulation (0,13639 mm). The observed deformation under maximum load can lead to

Table 2. Parameterization of the applied loads

Design point	Nodal force (N)	Maximum total deformation (mm)	Maximum equivalent effort (MPa)	Security factor	Fatigue factor
1	500	0,033979	8,6937	>15	>15
2	1000	0,068031	17,381	>15	7,5152
3	2000	0,135390	38,873	7,8052	3,6411

Source: Authors.

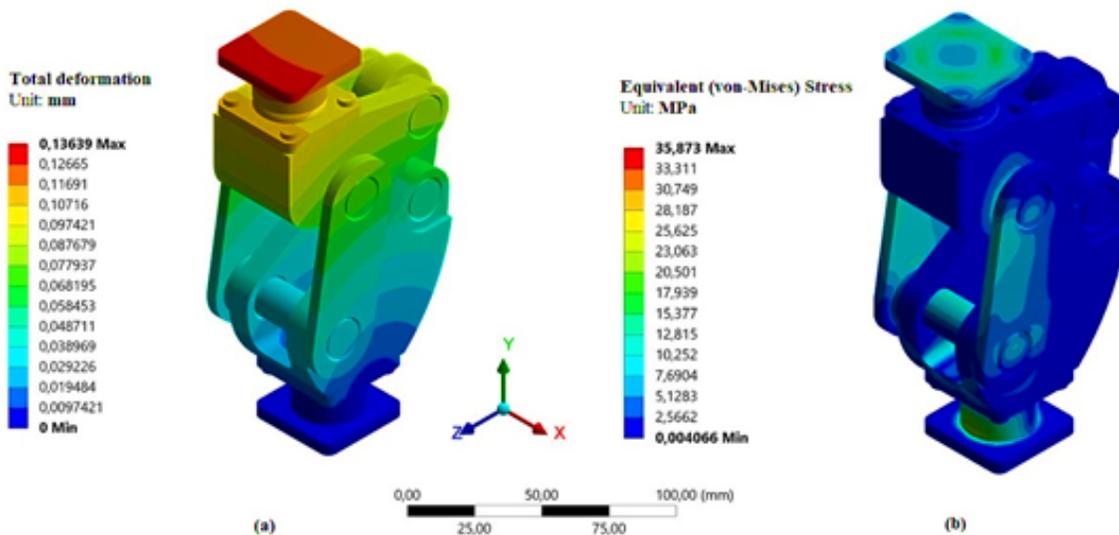


Figure 9. Model simulation results: a) total deformation and b) equivalent effort (Von Mises)

Source: Authors.

conclude that the elements are designed to work in the plastic zone of the materials, within which no significant total deformation is evidenced.

Equivalent effort (Von Mises)

As can be concluded from the results obtained, this element is not damaged by applying a static point load on its upper surface, which simulates a mass greater than 200 kg.

It is of great importance to highlight that the highest values are found in the upper and lower supports, where elements with right angles are evidenced and the change in the cross-section is abrupt. Another important parameter provided by this application is the security factor. These values contribute to reducing the failure of the material due to overload. A static load security factor and

a dynamic fatigue load factor corresponding to 7,8052 and 3,6411, respectively, were obtained from the simulation. The maximum effort was approximately 35 MPa and located on the upper surface (Figure 9b).

CONCLUSIONS

By studying the background of this type of work, it can be concluded that there is no established method for determination and optimization that converges to the location of the center of rotation of the knee. The use of natural coordinates should be considered as an efficient and concise method because it implies simpler equations and therefore involves the use of a smaller number of angular coordinates. According to the results obtained through the optimization process, an efficient method for determining the lengths of the links was obtained since the CIR of the mechanism closely resembled the CIR described by the knee joint, which was defined by the biomechanical analysis of the videos. The curves generated after the optimization process closely resemble those observed in the biomechanical analysis, which indicates that this method can be used in other studies that require the use of polycentric mechanisms, since they generate defined trajectories. According to the results obtained in the simulation, it was evidenced that the prosthesis model is structurally functional under static and dynamic loads that exceed nominal real load values.

FUNDING

Financial support was provided by the Mechanical Engineering program of Universidad de Pamplona, and technical support was provided by the Biomechanics Laboratory of the Department of Physical Education.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the Mechanical Engineering program of Universidad de Pamplona, as well as the technical support provided by the Biomechanics Laboratory of the Department of Physical Education.

REFERENCES

[Amador *et al.*, 2011] Amador, B. T., Torrealba, R. R., & Müller-Karger, C. M. (2011, March 28 - April 1). *Diseño conceptual de una prótesis policéntrica de rodilla para amputados transfemorales en Venezuela* [Conference presentation]. 2011 Pan American Health Care Exchanges Conference, Rio de Janeiro, Brazil. [↑Ver página 117](#)

- [Amador *et al.*, 2012] Amador, B. T., Torrealba, R. R., Rojas, M., Cappelletto, J., & Müller-Karger, C. M. (2012). Metodología para dimensionamiento de mecanismo policéntrico de rodilla utilizando análisis de marcha y algoritmos genéticos. *Revista Ingeniería Biomédica*, 6(11), 30-45. <https://doi.org/10.24050/19099762.n11.2012.102> ↑Ver página 125
- [Avello, 2014] Avello, A. (2014). *Teoría de máquinas* (2 nd ed.). Universidad de Navarra. ↑Ver página 117
- [Cáceres-Alvarado & Palacios-Mendoza, 2017] Cáceres-Alvarado, L. A., & Palacios-Mendoza, F. M. (2017). *Utilización del software Kinovea para evaluar la biomecánica de la marcha en pacientes con hemiparesia por secuela de evento cerebrovascular, que acuden al centro de rehabilitación Luis Vernaza de la ciudad de Guayaquil* [Undergraduate thesis, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/9250> ↑Ver página 120
- [Cárdenas *et al.*, 2016] Cárdenas, A. M., Uribe, J., & Hernández, A. M. (2016, October 26-28). *Parametric modeling of kinetic-kinematic polycentric mechanical knee* [Conference presentation]. VII Latin American Congress on Biomedical Engineering, CLAIB 2016, Bucaramanga, Colombia. ↑Ver página 117
- [Castro-Valladares, 2012] Castro-Valladares, L. D. (2012). *Diseño y modelado virtual del mecanismo policéntrico de una prótesis de rodilla* [Undergraduate thesis, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/21422> ↑Ver página 123
- [Edelstein & Moroz, 2011] Edelstein, J. E., & Moroz, A. (2011). *Lower-limb prosthetics and orthotics: Clinical concepts*. Slack Incorporated. ↑Ver página 117
- [Kyungsoo *et al.*, 2015] Kyungsoo, K., Jun, F., Kyung, W. N., Won, M. P., & Yoon, H. K. (2015). Improvement of the knee center of rotation during walking after openenig wedge high tibial osteotomy. *Journal of Engineering in Medicine*, 229(6), 464-468. <https://doi.org/10.1177/0954411915585379> ↑Ver página 117
- [Luengas & Penagos-Marcelo, 2017] Luengas, L., & Penagos-Marcelo, L. A. (2017). Identificación del comportamiento de parámetros biomecánicos en la alineación estática de prótesis transtibiales utilizando SVM'S. *Tecnura*, 20, 31-42. <https://doi.org/10.14483/22487638.11677> ↑Ver página 117
- [Martínez, 2013] Martínez, F. (2013). *Diseño de prótesis transfemoral activa*. Centro Nacional de Investigación Y Desarrollo Tecnológico. ↑Ver página 117
- [Nikravesh, 2007] Nikravesh, P. E. (2007). *Planar multibody dynamics: Formulation, programming and applications*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/b15878> ↑Ver página 119

- [Ocampo *et al.*, 2010] Ocampo, M. L., Henao, L. M., & Vásquez, L. (2010). *Amputación de miembro inferior: cambios funcionales, inmovilización y actividad física*. Editorial Universidad del Rosario. ↑Ver página 117
- [Parkin, 2016] Parkin, D. J. (2016). Helping Colombia's landmine survivors. *The Lancet*, 387(10033), 2079-2080. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)30597-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)30597-9) ↑Ver página 117
- [Romero-Núñez, 2016] Romero-Núñez, N. N. (2016). Análisis de posición de un mecanismo de cuatro barras utilizando coordenadas naturales. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 20(2), 83-90. <https://www.uned.es/universidad/dam/facultades/industriales/RIBIM/volumenes%20hasta%202019/Vol20N2Octubre2016/V20N2A08.pdf> ↑Ver página 119
- [Romero-Núñez & Flórez-Serrano, 2018] Romero-Núñez, N. N., & Flórez-Serrano, E. G. (2018). Position analysis of a mechanism Stephenson type I using natural coordinates. *Dyna*, 85(204), 91-97. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.60539> ↑Ver página 117
- [Titchenal *et al.*, 2017] Titchenal, M. R., Chu, C. R., Erhart-Hledik, J. C., & Andriacchi, T. P. (2017). Early changes in knee center of rotation during walking after anterior cruciate ligament reconstruction correlate with later changes in patient-reported outcomes. *The American Journal of Sports Medicine*, 45(4), 915-921. <https://doi.org/10.1177/0363546516673835> ↑Ver página 117



Uso de robótica en una emergencia sanitaria

Employing Robotics in a Health Emergency

Yeyson Alejandro Becerra Mora ¹, Mario Ricardo Arbulu Saavedra ²

Fecha de Recepción: 04 de noviembre de 2021

Fecha de Aceptación: 20 de abril de 2022

Cómo citar: Becerra-Mora., Y.A. y Arbulu-Saavedra, M.R. (2022). Uso de robótica en una emergencia sanitaria. *Tecnura*, 26(73), 130-141. <https://doi.org/10.14483/22487638.17320>

Resumen

Contexto: La covid-19 ha acelerado la integración de la robótica y sistemas autónomos a los distintos sectores económicos, esto se ha presentado principalmente por la necesidad de mantener a las personas distanciadas para reducir el riesgo de contagio. En el mundo, han venido emergiendo y adaptándose diversos sistemas robóticos para ayudar a combatir la pandemia y reactivar nuevamente la economía.

Método: Este trabajo presenta inicialmente las medidas que se han tomado en el mundo para luchar en contra de la pandemia, así como el impacto que ha dejado en la economía global. Posteriormente se seleccionan tres grupos de robots y se demarcan las principales tareas que estos han desarrollado durante dicho periodo.

Discusión: Si bien la robótica se presenta como una herramienta en la lucha contra la pandemia y un motor para reactivar la economía, se deben tener en cuenta desafíos como el remplazo de humanos por robots en ciertas labores, mayor inequidad, falta de privacidad en espacios públicos e incremento de recursos para la investigación en robótica.

Conclusiones: Se prevé un incremento en la demanda de robots para los próximos años, así como un decremento en la interacción entre humanos. El fin de la pandemia no hará retroceder la integración de los robots a los diversos sectores de la economía. La robótica es una tecnología disruptiva que hará cambiar al mundo en los próximos años.

Palabras clave: robótica, pandemia, covid-19.

Abstract

Context: The COVID-19 has accelerated robotics and automated systems integration to the different economic sectors, it has mainly gotten presented by the necessity to keep estranged people in order to reduce contagious risk. All around the World, robotic systems have been emerging and adapting to fight against pandemic and reactivate economy again.

¹Ingeniero en Automatización, máster en Automática y Robótica. Docente de la Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN). Bogotá, Colombia.

Email: yeyson_becerra@cun.edu.co

²Ingeniero electromecánico; máster en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática; Ph. D. en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática. Docente de la Corporación Universitaria del Huila (CORHUILA). Neiva, Colombia.

Email: ricardo.arbulu@corhuila.edu.co

Method: This paper initially presents the measures that have been taken to combat COVID-19, as well as the impact the virus has had on the world economy. Subsequently, three categories of robots have been selected and their main duties during the pandemic.

Discussion: While robotics turn to a tool to combat COVID-19 and an engine to reactivate the economy again, it should be considered the following challenges: humans replaced by robots in some labours, rise of inequality, lack of privacy in public spaces, and rise of resources to research in robotics.

Conclusions: Increase in robot demand is foreseen for the next years, as well as human interaction decrease is expected. The end of the pandemic will not go back to the robot integration in the diverse economy sectors. Robotics is a disruptive technology that will change the World in the next years.

Keywords: robotics, pandemic, covid-19.

Tabla de Contenidos

	Página
Introducción	131
Clasificación de robots	133
Robots en la covid-19	133
Discusión	137
Conclusiones	138
Financiamiento	139
Referencias	139

INTRODUCCIÓN

A partir del brote de la covid-19 a finales de 2019 ([World Health Organization, 2020](#)) ([Davidson, 2020](#), p.2) en la ciudad de Wuhan (China), se empezaron a idear estrategias para evitar un mayor número de contagiados, una de ellas fue generar distanciamiento entre las personas y el uso de tapabocas; se estima que el cumplir con este par de normas puede reducir la propagación del virus hasta en un 85 % ([Chu et al., 2020](#), [Yamey, 2020](#)) o, inclusive, reducir el número de encierros a los que se han visto sometidos diversos países ([Stutt et al., 2020](#)). Rápidamente, el país asiático comenzó a identificar necesidades generadas a raíz de la pandemia, entre ellas el desarrollo de infraestructura (p. ej., hospitales, centros hospitalarios); cambios en las líneas de producción para priorizar los bienes médicos, así como el transporte de estos mismos tanto a nivel nacional como internacional; y finalmente, la integración de sistemas autónomos e inteligencia artificial (IA) para ayudar a combatir la pandemia ([Chen et al., 2020](#)).

La pandemia desveló la vulnerabilidad del sistema de salud (McClean, 2020) y la poca investigación realizada para afrontar este tipo de catástrofes; la economía y la manufactura se vieron afectadas considerablemente, haciendo que miles de compañías alrededor del mundo tuvieran que cerrar o cambiar su modelo de negocio, en otros casos, modelos de negocio surgieron aprovechando la actual coyuntura. La actual recesión económica que se está viviendo en el mundo, y las proyecciones que se tienen para el producto interno bruto (PIB) de países como Estados Unidos, China, Japón y los pertenecientes a la Comunidad Europea para los próximos dos años, presentan un escenario complejo para la economía mundial, solamente comparada con la Gran Depresión de los años 1930 (Gopinath, 2020).

Otro de los problemas que ha surgido debido a la pandemia, más exactamente con las cuarentenas y encierros que han interpuesto diversos Gobiernos para mantener el distanciamiento entre personas, es el aislamiento, el cual genera un impacto negativo en la salud mental (Banks y Xu, 2020). En los países en los que se prolongó el encierro, como fue el caso de Colombia, secuelas del aislamiento se pueden ver con el transcurrir de los meses o incluso años; no tener contacto con familiares o amigos puede repercutir en el comportamiento de la sociedad.

Debido a las estrategias empleadas en el ámbito mundial para reducir el riesgo de contagio, las necesidades identificadas y los problemas generados por la covid-19, la robótica se presenta como una herramienta tecnológica para luchar en contra de la actual y futuras pandemias. Desde comienzos del brote de la covid-19, la robótica se identificó como una alternativa para reducir el contacto entre personas, y de esta forma reducir el riesgo de contagio. Con el pasar de las semanas se fueron identificando otras tareas que también los robots podían hacer, como desinfección de espacios (Lerman, 2020), monitoreo de variables, interacción social (Henkel *et al.*, 2020), entre otras.

La investigación en robótica que ha surgido en los últimos meses probablemente no vaya a hacer mucha diferencia en la pandemia actual, pero sí va a hacer diferencia en las futuras pandemias; sin embargo, se debe aprender de las lecciones que ha venido dejando esta, entre otras catástrofes (p. ej., Planta Nuclear Fukushima Daiichi - Kawatsuma *et al.* (2012), y no esperar a que ocurra otra para construir robots más autónomos e inteligentes que nos ayuden a llevar mejor estas situaciones extremas. El sector de la salud y la seguridad social deben ser más conscientes de emplear más robots en sus labores habituales; además de otros sectores económicos que comprometan la seguridad humana.

Con la tecnología robótica actual que se cuenta, no se puede afirmar que los robots sean capaces de reemplazar 100% a los humanos en la lucha contra la pandemia, pero sí que pueden ayudar con tareas riesgosas o no factibles en su realización. También se ha visto, en los últimos meses, que los robots más empleados durante esta pandemia han sido previamente utilizados con regularidad en otras situaciones y/o entornos (Berreby, 2020); esto se debe a que el personal interesado no cuenta con el tiempo suficiente para evaluar prototipos, ya que toda su atención se centra en la emergencia. Otra razón por la que se evita recurrir a prototipos en la actual pandemia, se debe a que las fases de diseño, desarrollo y experimentación pueden tardar años en finalizar; por lo que se prefiere reorientar las tareas de robots existentes, además de que abre un nuevo nicho de mercado para sus desarrolladores.

CLASIFICACIÓN DE ROBOTS

Las tareas más concurrentes realizadas por robots durante la pandemia se clasifican, según el tipo de robot empleado, en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de robots según tareas realizadas durante la pandemia

Robots móviles	Desinfección de espacios cerrados, como hospitales, oficinas, establecimientos educativos, entre otros.	Transporte autónomo de bienes médicos, bienes comerciales, alimentos, pruebas médicas, entre otros.	Emisión de mensajes motivacionales o de cuidado de cara a la pandemia.	Interacción entre pacientes o personas aisladas en tiempo real con familiares y/o seres queridos.	Soporte al personal médico para la toma de temperatura, saturación de oxígeno, presión sanguínea, entre otras.	Comunicación entre personal médico y pacientes, manteniendo un distanciamiento seguro para ambas partes.
Drones (UAV)	Desinfección de espacios abiertos, como calles, parques, plazas, entre otros.	Generación de alertas por violación del aislamiento.	Transporte autónomo de bienes médicos, bienes comerciales, alimentos, pruebas médicas, entre otros.	Detección de focos virales y distanciamiento social preventivo.	Soporte al desarrollo de infraestructura.	
Brazos robóticos	Manipulación de pruebas y/o desperdicios contaminados por el virus.	Toma y clasificación de muestras.				

Como se observa en la tabla, gran parte de las tareas han sido ejecutadas por robots móviles, con más alta participación en entornos cerrados; los drones han sido mayormente utilizados en espacios abiertos; y finalmente, los brazos robóticos han sido empleados para tareas repetitivas. La gran mayoría de robots que han sido empleados durante la pandemia han sido teleoperados a través de un mando, tanto para el caso de los robots móviles como de los drones; sin embargo, los robots autónomos también han sido protagonistas en la lucha contra la pandemia (p. ej., desinfección de espacios cerrados). Las características de *hardware* y *software* que se encuentran en robots autónomos son sensores LiDAR, GPS, cámaras y algoritmos de navegación, básicamente. En el caso de los brazos robóticos, se han programado rutinas que permitan realizar tareas repetitivas o, en otros casos más puntuales, que manipulen un objeto a partir de las órdenes dadas por un algoritmo de visión por computador.

ROBOTS EN LA COVID-19

Han emergido un gran número de aplicaciones robóticas alrededor del mundo para enfrentar la covid-19. A continuación se exponen algunas de ellas.

Con el fin de mantener distanciamiento entre personas, un bar en Pamplona (España) ha integrado a su cuerpo de trabajo un robot camarero. Este, desarrollado por Cocuus, lleva las bebidas desde la barra del bar hasta las mesas que las solicita, teniendo como guía una barra magnética ubicada el suelo. Otras compañías como Kiwibot, Starship y JD.com, han hecho lo propio para llevar domicilios

a lo largo de las ciudades donde operan. Para esto casos, el entorno es más desafiante debido a la gran cantidad de dinámicas que se presentan al recorrer una ciudad; por ello, el robot debe estar sensando y tomando decisiones constantemente para llegar a su objetivo. El aporte de estas empresas ha ayudado a que la economía se reactive en medio de esta pandemia (figura 1).

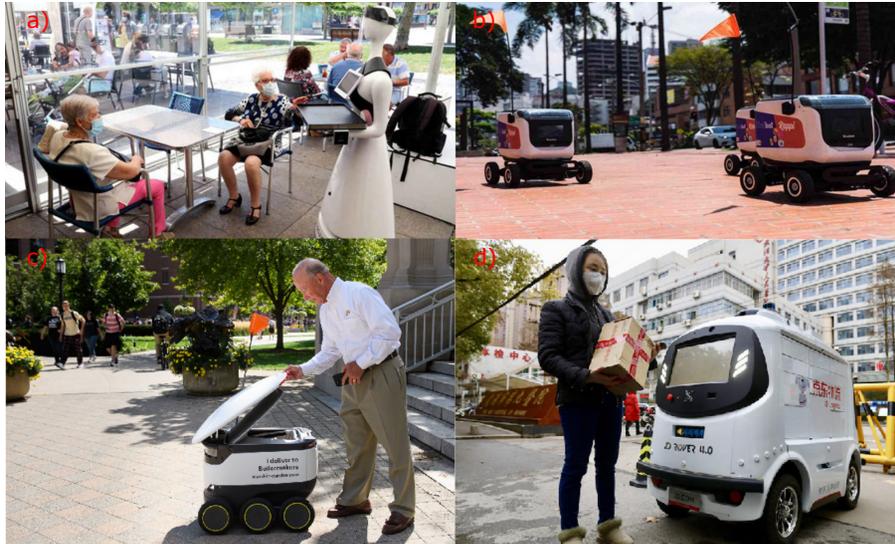


Figura 1. a) Robot mesero en un bar de España; b) robots móviles en Colombia para transporte de productos; c) robot móvil en Estados Unidos; d) robot móvil en China

Fuente: autores.

Para ayudar en tareas de desinfección, la compañía UVD Robots emplea robots móviles autónomos equipados con arreglos de lámparas de luz ultravioleta, sensores LiDAR y algoritmos de navegación (SLAM); este robot solo opera cuando no se presentan personas alrededor (figura 2a). Con características *hardware* y *software* semejantes a las previamente mencionadas, la compañía Pudu Robotics descubrió un nuevo nicho de mercado a raíz de la pandemia: llevar alimentos a viajeros aislados en hoteles (figura 2b).



Figura 2. a) Robot móvil para desinfección de cuartos hospitalarios; b) robot móvil para transporte de alimentos

Fuente: autores.

Los robots móviles con una pantalla en su parte superior/frontal, o inclusive a los cuales se les ha adaptado tabletas (figura 3), han permitido realizar labores de telepresencia, como es el caso de Spot, de Boston Dynamics, que ayuda a examinar pacientes de forma remota; participar en ceremonias de graduación, como lo propuso la Business Breakthrough University con ayuda de la compañía Ohmnilabs que dispuso su robot Newme para tal fin; y visitar a personas aisladas en geriátricos u hoteles, como lo propone la compañía RobShare con su robot *James*; la compañía Ava Robotics; entre otras. Los robots para estas tareas son regularmente teleoperados, aunque también pueden operar en ciertos entornos de forma autónoma.



Figura 3. a) Robots teleoperados en ceremonia de graduación; b) robot Spot en tareas de telepresencia; c) y d) robots móviles en geriátricos

Fuente: autores.

El hospital Bulovka, en Praga (República Checa), adaptó a sus instalaciones un brazo robótico de la compañía Kuka para que este ayudara a verter un químico en las muestras de pacientes en busca de posibles infectados con el virus (figura 4b). Este robot puede trabajar hasta con 700 muestras por día; esto permite reducir el riesgo de error y facilita el trabajo técnico. Otro sistema que también emplea un brazo robótico de Universal Robots, además de técnicas de visión por computador y *machine learning*, fue el desarrollado por la compañía Lifeline Robotics en conjunto con Southern University

of Denmark, el cual se encarga de introducir hisopos en las gargantas de las personas para tomar muestras en búsqueda del virus de la covid-19 (figura 4a).



Figura 4. a) Brazo robótico introduciendo hisopo; b) brazo robótico vertiendo químico en muestras

Fuente: autores.

La compañía MicroMultiCopter suministró a las autoridades chinas más de 100 drones a las autoridades de 11 ciudades chinas, en marzo de 2020; se estima que cada uno de estos robots puede reemplazar labores de vigilancia realizadas por 100 agentes de la policía en un área de 10 km². Igualmente en China, se emplearon drones para mantener iluminada el área de construcción para un nuevo hospital en una zona aislada. Por otro lado, la compañía Zipline ha usado sus drones en esta pandemia para realizar entregas de diversos insumos (guantes, tapabocas, trajes, vacunas, etc.); sin embargo, ya traían experiencia con este tipo de entregas en poblaciones africanas donde el acceso por tierra tiende a ser complejo (figura 5).

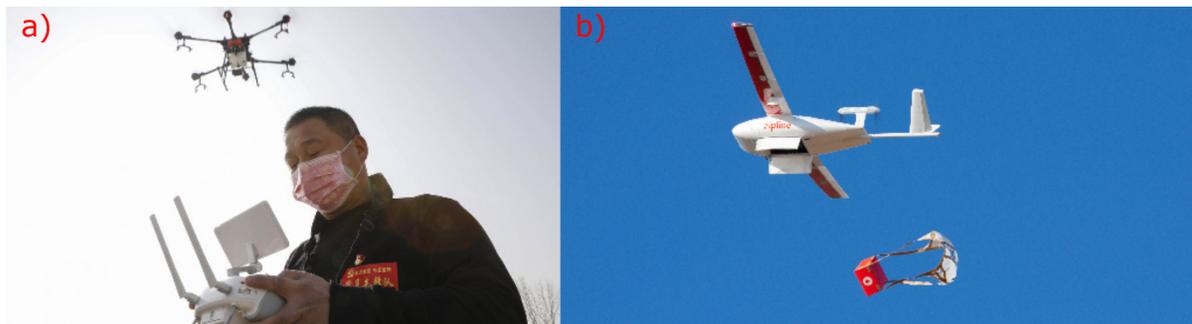


Figura 5. a) Drone efectuando labores de vigilancia; b) drone realizando entrega de insumos médicos

Fuente: autores.

Los robots enfermeros también han emergido en esta pandemia, un ejemplo de ellos ha sido *Tommy*, un robot que ha venido ayudando a médicos y enfermeras a cuidar personas enfermas por la covid-19. *Tommy* permite la comunicación entre paciente y personal médico, así como la medición de presión sanguínea y saturación de oxígeno en pacientes que se encuentren en la unidad de cuidados

intensivos (UCI). La compañía UBTEch robots, con su robot *Aimbot*, ha colaborado al personal médico en la toma de temperatura, la verificación del uso de tapabocas y la realización de videoconferencias; estos androides han sido empleados en China, Japón y Bélgica (figura 6).



Figura 6. Robots móviles ejerciendo labores de telemedicina

Fuente: autores.

En fin, diversas compañías han venido surgiendo en esta emergencia sanitaria, y otras han descubierto nuevos nichos de mercado gracias a la pandemia. Además, diversos grupos de investigación alrededor del mundo han propuesto diversos sistemas robóticos en la lucha contra la pandemia; aunque, como ya se mencionó, posiblemente no vayan a ser de gran utilidad para esta pandemia, pero sí para futuras.

DISCUSIÓN

Si bien la covid-19 está acelerando el ingreso de robots y sistemas autónomos a la sociedad actual, lo cual traerá beneficios a la humanidad en un futuro próximo, se viene una serie de desafíos que deben ser tenidos en cuenta más pronto de lo esperado. Uno de ellos, y que preocupa a una población significativa a nivel mundial, es el remplazo de humanos por robots en diversas labores (p. ej., repetitivas, de fuerza, riesgosas, etc.). Se sabe que un robot es más costoso que un humano para ser integrado en las labores de una compañía, pero a la larga, el robot ya integrado se vuelve más económico que tener un humano para esas mismas labores. Muchas compañías están pensando en remplazar humanos con robots debido a la actual crisis sanitaria, con el fin de mantener niveles de producción y distanciamiento entre empleados; esto puede llevar a un escenario de baja probabilidad en el que se creen nuevos contratos, una vez se supere la pandemia para las labores tomadas por los robots durante esta. Se estima que un tercio de los trabajadores en Estados Unidos sería remplazado por robots y automatización para el año 2030 (Manyika *et al.*, 2017). Sin embargo, el desempleo en masa debido a los robots no es lo único por lo cual preocuparse; según Schlogl y Sumner, 2018, la robótica y la inteligencia artificial (IA) puede llevar a estancamiento de salarios, desindustrialización y mayor inequidad en la sociedad actual; con una consecuente mayor afectación a los países en vías de desarrollo.

En la pandemia generada por la covid-19 se ha podido observar que la mayoría de los robots empleados para esta han sido teleoperados, lo cual lleva a pensar en incrementar la investigación en robots autónomos para próximas catástrofes. Igualmente, se debe promover el estudio en robótica cooperativa, destreza robótica, navegación inteligente, incremento de eficiencia en toma de datos (empleo de sensores, visión por computador, etc.) y detección de zonas de alto riesgo. Con trabajos de este tipo se pueden contener futuras pandemias de una forma más eficiente o, inclusive, evitar llegar a una de estas.

Una de las medidas que se tomó para evitar la propagación del virus fue el confinamiento, hacer que las personas se mantengan en sus hogares la gran mayoría del tiempo; otra fue el distanciamiento, evitar que las personas se aglomeren en espacios públicos. Inclusive, se ha promovido el uso de cámaras que permitan el reconocimiento facial de personas para hacer el seguimiento respectivo a aquellas que den positivo en los test covid-19. Estas regulaciones pueden ser ejecutadas eficientemente por robots autónomos que cuenten con cámaras y sensores; sin embargo, esto lleva a reducir la privacidad en espacios públicos, lo cual debe ser debidamente estudiado para aprovechar la tecnología sin perjudicar a la sociedad.

Estas medidas de confinamiento y distanciamiento aceleraron el uso de robots teleoperados, los cuales permiten la interacción entre humanos sin tener que compartir un mismo entorno. Los *social robots* se han presentado también como alternativa para el acompañamiento de personas afectadas por el aislamiento; aunque aún se encuentran en una etapa temprana de desarrollo, debido a que se debe tener en cuenta algo tan complejo como la interacción social (p. ej., conocimiento, creencias, emociones, entorno, etc.).

Estas herramientas tecnológicas están ayudando a la salud mental de las personas que se encuentran aisladas (p. ej., personas de la tercera edad, personas contagiadas, etc.) debido a la pandemia; por tanto, se debe continuar investigando sobre estos ámbitos para poder llegar a un mayor número de personas afectadas por catástrofes o, simplemente, para seguir construyendo una mejor sociedad.

CONCLUSIONES

Debido al distanciamiento social generado por la pandemia, se ha evidenciado un incremento en la demanda de robots alrededor del mundo, esto se debe a que las personas quieren reducir el contacto con el fin de minimizar el riesgo de contagio. Además, se prevé que la demanda se mantendrá en aumento para los próximos años, ya que diversas compañías han identificado y adoptado la robótica como herramienta para avanzar en sus modelos de negocio, igualmente las inversiones que se han realizado en esta tecnología han sido considerables; por tanto, se espera que los robots se mantengan después de la pandemia. La adopción de robots ha permitido que diversos establecimientos públicos alrededor del mundo reabran sus puertas, probando la eficacia de esta tecnología; esto ratifica un aumento en la demanda de robots.

Se espera que la interacción entre humanos se reduzca en los próximos años, lo que marca una prevalencia en espacios donde se presenten robots o entornos automatizados para mantener un distanciamiento seguro entre personas. Un ejemplo de ello es la cadena McDonald's, la cual se propuso en mejorar los tiempos de entrega de sus hamburguesas a través de robots que las fríen o, inclusive, toman las ordenes de los clientes. Este nuevo desarrollo en sus restaurantes no solamente mejorará los tiempos de entrega, sino también reducirá el contacto entre personas, lo cual le permitirá a la cadena estar por delante de sus competidores. Otro ejemplo es lo que han venido haciendo las compañías Walmart y Amazon en los últimos años para automatizar sus bodegas y ofrecer sus productos en el menor tiempo posible; con la pandemia, han encontrado una razón más para incrementar el número de robots empleados en sus instalaciones, mejorar el bienestar y la salud de sus empleados.

Debido al incremento de la demanda en esta tecnología, se está acelerando el desarrollo de la robótica y de los entornos automatizados, lo cual también lleva a un incremento en las labores de investigación necesarias para la creación de nuevos robots. Se espera que, en el periodo de pospandemia, se encuentre un mayor número de robots integrados en las actividades del diario vivir. El reducir la interacción/contacto entre humanos, por medio de robots o sistemas autónomos, puede llevar al incremento de enfermedades por sedentarismo en un futuro no muy lejano; por consiguiente, es importante tener presente la actividad física diaria para no estar creando un nuevo problema a partir de un avance tecnológico.

FINANCIAMIENTO

Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN).

REFERENCIAS

- [Banks y Xu, 2020] Banks, J., y Xu, X. (2020). The Mental Health Effects of the First Two Months of Lockdown during the COVID-19 Pandemic in the UK. *Fiscal Studies*, 41(3), 685-708. <https://doi.org/10.1111/1475-5890.12239> ↑Ver página 132
- [Berreby, 2020] Berreby, D. (3 de septiembre de 2020). *The pandemic has been good for one kind of worker: robots*. National Geographic. <https://www.nationalgeographic.com/science/article/how-pandemic-is-good-for-robots> ↑Ver página 132
- [Chen *et al.*, 2020] Chen, B., Marvin, S., y While, A. (2020). Containing COVID-19 in China: AI and the robotic restructuring of future cities. *Dialogues in Human Geography*, 10(2), 238-241. <https://doi.org/10.1177/2043820620934267> ↑Ver página 131
- [Chu *et al.*, 2020] Chu, D. K., Akl, E. E., Duda, S., Solo, K., Yaacoub, S. y Schunemann, H. J. (2020). Physical distancing, face masks, and eye protection to prevent person-to-person transmission of

- SARS-CoV-2 and COVID-19: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet*, 395, 1973-1987. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31142-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31142-9) ↑Ver página 131
- [Davidson, 2020] Davidson, H. (13 de marzo de 2020). First Covid-19 case happened in November, China government records show-report. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2020/mar/13/first-covid-19-case-happened-in-november-china-government-records-show-report> ↑Ver página 131
- [Gopinath, 2020] Gopinath, G. (14 de abril de 2020). *The Great Lockdown: Worst Economic Downturn Since the Great Depression*. International Monetary Fund. <https://blogs.imf.org/2020/04/14/the-great-lockdown-worst-economic-downturn-since-the-great-depression/> ↑Ver página 132
- [Henkel *et al.*, 2020] Henkel, A., Caic, M., Blaurock, M. y Okan, M. (2020). Robotic transformative service research: deploying social robots for consumer well-being during COVID-19 and beyond. *Journal of Service Management*, 31(6). <https://doi.org/10.1108/JOSM-05-2020-0145> ↑Ver página 132
- [Kawatsuma *et al.* (2012)] Kawatsuma, S., Fukushima, M. y Okada, T. (2012). Emergency response by robots to Fukushima-Daiichi accident: summary and lessons learned. *Industrial Robot*, 39, 5, 428-435. <https://doi.org/10.1108/01439911211249715> ↑Ver página 132
- [Lerman, 2020] Lerman, R. (8 de septiembre de 2020). Robot cleaners are coming, this time to wipe up your coronavirus germs. *The Washington Post*. <https://www.washingtonpost.com/technology/2020/09/08/robot-cleaners-surge-pandemic/> ↑Ver página 132
- [Manyika *et al.*, 2017] Manyika, J., Lund, S., Chui, M., Bughin, J., Woetzel, J., Batra, Ko, R. y Sanghvi, S. (2017). *Jobs lost, jobs gained: What the future of work will mean for jobs, skills, and wages*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/jobs-lost-jobs-gained-what-the-future-of-work-will-mean-for-jobs-skills-and-wages> ↑Ver página 137
- [McClean, 2020] McClean, D. (18 de diciembre de 2020). *COVID-19 exposes "deep-rooted vulnerabilities" in public health infrastructure*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. <https://www.undrr.org/news/covid-19-exposes-deep-rooted-vulnerabilities-public-health-infrastructure> ↑Ver página 132
- [Schlogl y Sumner, 2018] Schlogl, L. y Sumner, A. (2018). *The rise of the robot reserve army: Automation and the future of economic development, work, and wages in developing countries*. CGD Working

Paper, 487. Center for Global Development. <https://www.cgdev.org/publication/rise-robot-reserve-army-automation-and-future-economic-development-work-and-wages> <https://doi.org/10.2139/ssrn.3208816> ↑Ver página 137

[Stutt *et al.*, 2020] Stutt, R. O., Retkute, R., Bradley, M., Gilligan, C. A. y Colvin, J. (2020). A modeling framework to assess the likely effectiveness of facemask in combination with “lock-down” in managing the COVID-19 pandemic. *The Royal Society*, 476, 20200376. doi.org/10.1098/rspa.2020.0376 <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0376> ↑Ver página 131

[World Health Organization, 2020] World Health Organization. (2020). *Coronavirus Disease 2019 (COVID-19): Situation Report - 94*. <https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200423-sitrep-94-covid-19.pdf> ↑Ver página 131

[Yamey, 2020] Yamey, G. (29 de junio de 2020). We have a cheap, effective way to keep ourselves safer from COVID-19. Why are we fighting about it? *Time*. <https://time.com/5861295/masks-covid19-spread-fighting/> ↑Ver página 131



Métodos cuantitativos de evaluación del espacio público: aporte al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Quantitative methods of public space evaluation: Contribution to the fulfillment of the SDGs

Tania Giraldo-Ospina ¹, Jorge Galindo-Díaz ², Luis R. Vásquez-Varela ³

Fecha de Recepción: 21 de noviembre de 2021

Fecha de Aceptación: 20 de abril de 2022

Cómo citar: Giraldo-Ospina, T. Galindo-Díaz, J y Vásquez-Varela, L.R. (2022). Métodos cuantitativos de evaluación del espacio público: aporte al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. *Tecnura*, 26(73), 142-161. <https://doi.org/10.14483/22487638.18817>

Resumen

Objetivo: Revisar y contrastar métodos cuantitativos de evaluación de la calidad del espacio público que pueden aportar al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Metodología: Se seleccionaron siete métodos de evaluación a partir de publicaciones disponibles en las bases de datos *Scopus*, *SpringerLink*, *ScienceDirect*, *Latindex*, *Scielo* y *Redalyc* basados en publicaciones realizadas entre 2000 y 2020; se incluyeron referencias significativas de años anteriores de acuerdo con las citas halladas en dichos documentos. Los métodos se contrastaron según dimensiones de calidad, criterios de ponderación y variables.

Resultados: La evaluación de la calidad del espacio público mediante métodos cuantitativos contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, porque utiliza metas concretas y medibles; el uso de datos cuantitativos facilita la realización de un diagnóstico técnico de la condición de sus elementos. Las variables se agruparon en dimensiones; la accesibilidad y el confort fueron las que tuvieron mayor relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Los métodos consultados son costosos y complejos, necesitan un análisis de actividades y comportamientos de los usuarios. Sin métodos prácticos es difícil visibilizar las necesidades de infraestructura y satisfacer los Objetivos de Desarrollo Sostenible en cuanto a espacio público de buena calidad.

Conclusiones: Los métodos revisados incluyen una evaluación sin desagregación de la calidad de los elementos individuales que constituyen el espacio público; es un desafío diseñar instrumentos de evaluación para todo tipo de espacio público. La práctica tradicional es construir nuevos espacios o remodelar los existentes, sin considerar la financiación para el mantenimiento de todo el sistema en operación.

¹Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo, arquitecta. Profesora asociada, Escuela de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Nacional de Colombia, Manizales (Colombia).

Email: tgiraldo@unal.edu.co

²Ph. D. en Arquitectura por la ETSAB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona (España), arquitecto. Profesor titular, Escuela de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Nacional de Colombia, Manizales (Colombia).

Email: jagalindod@unal.edu.co

³Magíster en Ingeniería-Geotecnia, ingeniero civil. Profesor asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Manizales (Colombia).

Email: lrvasquezv@unal.edu.co

Financiamiento: Universidad Nacional de Colombia.

Palabras clave: espacio público, planeación urbana, gestión urbana, desarrollo sostenible, método de evaluación.

Abstract

Objective: Reviewing and contrasting quantitative public space (PS) quality assessment methods that can contribute to the fulfillment of the sustainable development goals (SDG).

Methodology: Authors selected seven evaluation methods from research available in the SCOPUS, SpringerLink, Science-Direct, Latindex, Scielo, and Redalyc databases based on publications between 2000 and 2020. According to the citations found in said documents, the authors included significant references from previous years. The authors contrasted the methods according to quality dimensions, weighting criteria, and variables.

Results: The public space quality evaluation with quantitative methods contributes to the fulfillment of the sustainable development goals because it uses concrete and measurable goals. Quantitative data eases the technical diagnosis of public space elements conditions. The authors grouped the variables into dimensions; accessibility and comfort have the most significant relationship with the sustainable development goals. The reviewed methods are expensive and complex; they need an analysis of users' activities and behaviors. It is challenging to make infrastructure needs visible and meet sustainable development goals for good-quality public space without practical methods.

Conclusions: The reviewed methods include a quality evaluation, without disaggregation, of individual elements that constitute the public space. It is a challenge to design evaluation instruments for all types of public spaces. The traditional practice is to build new spaces or remodel existing ones without considering the financing for the maintenance of the entire system.

Financing: Universidad Nacional de Colombia.

Keywords: public space, urban planning, urban management, sustainable development, evaluation method.

Tabla de Contenidos

	Página
Introducción	144
Marco teórico	144
Espacio público	144
Gestión del espacio público	145
Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en la gestión del espacio público	146
Metodología	147
Resultados	147
Discusión	152
Conclusiones	154

Financiamiento	155
-----------------------	------------

Referencias	155
--------------------	------------

INTRODUCCIÓN

El espacio público (EP) ocupa un lugar central en la planificación, el diseño urbano, los procesos de crecimiento y la densificación urbana (Carmona *et al.*, 2019, Dempsey y Burton, 2012). Es el elemento más característico y legible de la estructura funcional y espacial de las ciudades, y satisface múltiples funciones para la sostenibilidad social, ecológica y económica de una ciudad (Sundevall y Jansson, 2020). El EP es infraestructura, recurso ambiental, bien colectivo y escenario de la vida social y económica que proporciona oportunidades para el desarrollo y el mejoramiento de la vida de individuos y comunidades (Madanipour 2019). Un EP de buena calidad optimiza y multiplica las posibilidades de contacto de la población y los lugares de encuentro; es parte integral de la vida urbana, esencial para la calidad de vida de sus habitantes y la prosperidad de las ciudades (Gehl, 2014, Borja y Muxí, 2003).

El objetivo de este trabajo es revisar y contrastar métodos cuantitativos de evaluación de la calidad del EP, que pueden aportar al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con este, teniendo en cuenta dimensiones de calidad, criterios de ponderación y variables de medida. Este trabajo se enfoca en métodos de evaluación de EP urbanos construidos de carácter permanente y de propiedad pública; correspondientes a los elementos del paisaje donde predominan las zonas duras cuyo uso, cobertura y configuración espacial permiten clasificarlas como espacios funcionales de los elementos grises de la matriz urbana, concepto que surge de entender la ciudad como un mosaico de hábitat complejo formado por distintas subunidades, que al mismo tiempo forma parte de un conjunto paisajístico más amplio (Haase *et al.*, 2020, Werner y Zahner, 2010, Swanwick *et al.*, 2003). Este conjunto de EP está integrado por plazas, parques, plazoletas, canchas, entre otros, y aporta servicios ecosistémicos culturales, oportunidades para la relajación, la recreación, el juego, la interacción social y la actividad física, con beneficios para la salud y el bienestar (Barton *et al.*, 2020).

El trabajo se desarrolla en cinco secciones. En la primera se expone el marco teórico sobre EP y ODS. En la segunda se presenta la metodología adoptada para la búsqueda sistemática de métodos cuantitativos de evaluación del EP en la literatura especializada. Las partes subsiguientes exponen los resultados, discusión y conclusiones propuestas por los autores.

MARCO TEÓRICO

Espacio público

El espacio público (EP) se encuentra en diferentes contextos, como la salud, la cultura, el ordenamiento territorial, el desarrollo sostenible, la resiliencia climática y sísmica, entre otros y, con fre-

cuencia, se enfatiza solo en algunos aspectos de su complejidad. Como resultado, surgen diferentes aproximaciones que contribuyen a la formulación e implementación de políticas públicas, lo cual se refleja en el creciente interés de investigadores y autoridades locales por la calidad del EP y la calidad de vida de los habitantes (Wojnarowska, 2016).

La creación de un entorno sostenible implica garantizar que las generaciones presentes y futuras puedan disfrutar de la calidad y los probados beneficios sociales, ambientales, económicos y para la salud que brindan los EP (Dempsey y Burton, 2012), en pro de la satisfacción de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

El EP es una infraestructura pública con un ciclo de vida finito y necesidades de reemplazo o actualización (Duivenvoorden *et al.*, 2020, Center for an Urban Future (CUF), 2018); es decir, es un activo cuyo valor se incrementa con la calidad; por ello, el uso de indicadores proporciona información relevante para los responsables de las políticas y los inversionistas de capital interesados en las condiciones del entorno (Chan *et al.*, 2018, Dempsey y Burton, 2012).

La calidad del EP es una determinante para propiciar el desarrollo de actividades sociales y está influenciada por la localización, el diseño, los usos del suelo adyacentes, el nivel de accesibilidad y la frecuencia de mantenimiento. Debe permitirse una conexión en doble sentido entre las cualidades particulares del lugar y los beneficios generados para los usuarios, pues la calidad define sus beneficios y, a su vez, estos determinan la calidad (Carmona *et al.*, 2019). El incremento de usuarios en el EP afecta la percepción de seguridad, incide en el uso diario y aumenta la necesidad de lugares de buena calidad; la presencia y el flujo de personas son el motor de dichas áreas (Herthog *et al.*, 2018).

Gestión del espacio público

La gestión del EP es un conjunto de procesos y prácticas que garantizan que este pueda cumplir con todas sus funciones de forma aceptable para los usuarios y sus interacciones (Zamanifard *et al.*, 2018, De Magalhães y Carmona, 2009); abarca dimensiones físicas y no físicas, según el contexto y su nivel de influencia (Dempsey y Burton, 2012). En ocasiones, la gestión suele separarse de la planificación; sin embargo, esta debe incluir el diseño, la evaluación de la calidad, la regulación y manejo de conflictos entre usos, la programación y priorización de rutinas de mantenimiento, y, en general, todas las actividades necesarias para conservar las funciones del EP (Ranjha, 2018).

La gestión del EP es un concepto reciente, no solo se trata del entorno físico, el diseño y el mantenimiento, sino que comprende dimensiones como la gobernanza, la financiación, la política y la evaluación de las actividades relacionadas con la conservación (Nam y Dempsey 2019, Mattijssen *et al.*, 2017, Dempsey y Burton, 2012, De Magalhães y Carmona, 2009, Carmona *et al.*, 2008). La evaluación se basa en la recopilación y análisis de datos, y sirve para establecer la programación óptima de las obras de reparación y mantenimiento (Jansson *et al.*, 2020, Fongar *et al.*, 2019, Smith *et al.*, 2014, Dempsey y Burton, 2012).

Los métodos cuantitativos analizan la relación entre variables numéricas medibles con instrumentos y procedimientos estadísticos, mientras los métodos cualitativos sirven para explorar y comprender el significado que los individuos o grupos atribuyen a un problema mediante palabras o descriptores (Creswell, 2014); se trata de una cualidad con un número asignado bajo un orden (Salgado Lévano, 2007). El uso de texto para la descripción de la calidad del EP requiere que los usuarios lean, interpreten, visualicen o imaginen la situación, lo cual es limitado y es una posible fuente de sesgo; mientras que el uso de números facilita la comprensión cuando se trata de la toma de decisiones o priorización de inversiones según la condición de los EP.

Los métodos cuantitativos son útiles cuando es necesario conocer el valor de los atributos o cuando se requiere una comprensión generalizada y cuantificable de las preferencias de los usuarios para evaluar económicamente las inversiones futuras. Sin embargo, debido a su valor relativo, es complejo identificar los atributos cuantitativos y cualitativos, y determinar su contribución y relevancia a cada característica (Hurtubia *et al.*, 2015). El principal reto es medir la calidad del EP de manera que transmita adecuadamente la naturaleza de todas las características tanto cuantitativas como cualitativas.

La conservación de la calidad implica el desarrollo de actividades permanentes que requieren ser supervisadas mediante el uso de indicadores de medición. Existen múltiples instrumentos para evaluar la calidad del EP, pero el uso de métodos cuantitativos para evaluar la condición de sus elementos es reducido; de igual modo, la planificación y el diseño de nuevos espacios son campos de investigación que predominan sobre la gestión a largo plazo (Duivenvoorden *et al.*, 2020, Mattijssen *et al.*, 2017). La evaluación de la calidad del EP mediante métodos cuantitativos es una alternativa para las autoridades locales, pues facilita el diagnóstico técnico de la condición de sus elementos, la supervisión periódica, la determinación de las oportunidades de financiación, la programación del mantenimiento y la priorización de las intervenciones.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en la gestión del espacio público

Las ciudades deben estar preparadas para las satisfacer las metas establecidas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2015) y enfrentar desafíos como la adaptación al cambio climático, la transición energética, la economía circular y la movilidad sostenible (Duivenvoorden *et al.*, 2020). Existe un conflicto entre el reconocimiento de los beneficios de los EP y la dificultad para conservar su calidad, aunado al incremento de nuevos usuarios, necesidades y actividades (Borja y Muxí, 2003, Light y Smith, 1998), y en el carácter multifacético por su incidencia en el entorno espacial, social, político y cultural (Dempsey y Burton, 2012). Asimismo, existen conflictos intergeneracionales y competencia entre los actores privados por el uso del espacio.

En el marco de la *Agenda 2030* (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2015) se acordaron 17 ODS. En la Nueva Agenda Urbana (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2017) se abordó el ODS11 “Ciudades y comunidades sostenibles”, el cual tiene como fin proporcionar acceso univer-

sal a zonas verdes y EP de buena calidad, seguros, inclusivos y accesibles, y los aspectos urbanos de los demás ODS. Por primera vez existen objetivos globales sobre las ciudades y se incorpora lo urbano como un asunto de política pública (Carrión, F. y Dammert-Guardia, 2019). En la tabla 1 se sintetizan los ODS 3, 5, 7, 8, 10, 11, 13 y 15 dedicados al futuro de las ciudades y el rol significativo de los EP.

METODOLOGÍA

Este artículo se basa en una revisión literaria de métodos cuantitativos de evaluación de la calidad del EP, los cuales se hallaron mediante la consulta de publicaciones disponibles en las bases de datos *Scopus*, *SpringerLink*, *ScienceDirect*, *Latindex*, *SciELO* y *Redalyc*. Se consultaron publicaciones realizadas entre 2000 y 2020, incluyendo referencias significativas de años anteriores según las citas incluidas en dichos documentos. En la tabla 2 se presentan los componentes, palabras claves y conectores empleados en la búsqueda.

Para determinar los aportes de los métodos consultados al cumplimiento de los ODS se identificaron las variables relacionadas con elementos de la infraestructura y se sintetizaron en siete dimensiones: accesibilidad, agradabilidad, confort, desarrollo sostenible, mantenimiento, seguridad y versatilidad. La injerencia de cada dimensión y sus variables en el cumplimiento de los ODS se clasifican en dos grupos: grupo A, para elementos con influencia directa, y grupo B, para aquellos cuyo efecto es indirecto o complementario. La influencia directa corresponde al efecto específico del elemento de infraestructura construido, por ejemplo, la iluminación tiene efectos directos en la seguridad e inclusión, e indirecto en la conservación de los ecosistemas terrestres. El grupo A no es más importante que el grupo B. La correlación entre los componentes del entorno construido y la satisfacción de los ODS se basa en el efecto positivo que tiene la realización de actividades al aire libre.

RESULTADOS

De acuerdo con la consulta bibliográfica realizada, la cuantificación de la calidad del EP es un área de investigación en progreso. Existe un amplio rango de características que inciden en la calidad del EP y hacen que su evaluación sea un tema complejo (Herthog *et al.*, 2018). Predominan, por ejemplo, las evaluaciones de calidad que utilizan métodos cualitativos sobre los cuantitativos (He *et al.*, 2020); en este caso, los indicadores de cantidad y calidad de los EP se han empleado en el análisis de la calidad de vida, el bienestar, la habitabilidad, la sostenibilidad urbana y los servicios ecosistémicos. También, existen métodos de evaluación cuantitativa que emplean instrumentos de medición sobre aspectos específicos como la radiación, el viento y el ruido; aunque, no son de uso cotidiano por las autoridades locales por carencia de recursos técnicos o humanos.

Tabla 1. El EP en el ámbito de los Objetivos de Desarrollo Sostenible

ODS	Meta	Relación con el EP
ODS3 Buena salud y bienestar	Garantizar vidas saludables y promover el bienestar para todas las personas de todas las edades.	Se requieren espacios para que las personas puedan estar físicamente activas. Los EP mejoran la salud mental y física, la habitabilidad urbana, el bienestar emocional, la calidad de vida urbana, aumentan el nivel de caminata (Nam y Dempsey, 2019, Lee et al., 2015) (Páramo y Burbano, 2013, Lee y Maheswaran, 2011) (Giles-Corti et al., 2005). También, promueven la interacción social, la tolerancia, el aprendizaje colectivo, la conciencia social y la conducta ética; contribuyen al intercambio de información; representan símbolos y memorias (Salih y Ismail, 2017) (Tomadoni y Romero Grezzi, 2014)
ODS5 Igualdad de género	Lograr la igualdad de género y empoderar a todas las mujeres y niñas.	Los EP seguros contribuyen a la igualdad de género porque fomentan la libertad de circulación y disfrute de actividades recreativas y culturales mejorando la salud y bienestar de mujeres y niñas (Daniel, 2016) (Sundevall y Jansson, 2020).
ODS7 Energía asequible y no contaminante	Tomar acción urgente para combatir el cambio climático y su impacto.	Los EP con zonas verdes y árboles ayudan a reducir la temperatura, ofrecen sombra, absorben los contaminantes atmosféricos, reducen el consumo de energía para refrigeración y mejoran las condiciones de confort térmico (Akbari et al., 2015).
ODS8 Trabajo decente y crecimiento económico	Promover un crecimiento económico inclusivo y sostenible, empleo pleno y productivo, y trabajo decente para todos.	Se necesitan lugares para que las personas de menores ingresos puedan ganarse la vida vendiendo productos y servicios (Daniel, 2016). Los EP atraen inversiones de empresas, constructores, compradores y visitantes (Carmona et al., 2008, Madanipour, 2019).
ODS10 Reducción de las desigualdades	Potenciar y promover la inclusión social, económica y política de todas las personas, independientemente de su edad, sexo, discapacidad, raza, etnia, origen, religión o situación económica u otra condición.	Brindar EP inclusivos y equitativos en su distribución y acceso (Kimpton, 2017).
ODS11 Ciudades y comunidades sostenibles	Proporcionar acceso universal a zonas verdes y EP seguros, inclusivos y accesibles, en particular para las mujeres y los niños, las personas de edad y las personas con movilidad reducida.	Proporcionar espacios abiertos, seguros y conectados para uso público de todos (Lee, 2021). Los EP mejoran la resiliencia sísmica porque sirven para apoyar los esfuerzos de respuesta y recuperación posterior a un desastre (Koren y Rus, 2019, French et al., 2019).
ODS13 Acción por el clima	Tomar acción urgente para combatir el cambio climático y su impacto.	Los EP con árboles y zonas verdes fortalecen la resiliencia climática porque contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y generan
ODS15 Vida de ecosistemas terrestres	Velar por la conservación y el uso sostenible de los ecosistemas y los servicios que proporcionan. Integrar los valores de los ecosistemas y la diversidad biológica en la planificación nacional y local, los procesos de desarrollo, las estrategias de reducción de la pobreza y la contabilidad.	Ofrecen servicios ecosistémicos; integran la naturaleza con el contexto urbano; protegen la biodiversidad y el paisaje; valoran la relación hombre y naturaleza hacia la sostenibilidad; aportan en la configuración del ecosistema urbano; proporcionan nichos para animales y aves (Ho et al., 2020, Osorio Guzmán et al., 2020) (Rakhshandehroo et al., 2017).

Fuente: Elaboración propia a partir de los autores citados.

Tabla 2. Componentes de búsqueda para la revisión bibliográfica

Componentes de búsqueda	Palabras clave	Operadores
Tema	"public space", "open space", "green open space"	"AND" y "OR"
Enfoque	"evaluation", "condition of public space", "quality of public space", "quantitative indicators", "management of public space", "place-keeping", "quality measure"	"AND" y "OR"
Objetivo	"review", "study", "critical review", research updates, "assessment system", "use of indicators", "evaluation model", "objective assessment", "systems evaluation", "quantitative evaluation methods"	"AND" y "OR"

Fuente: Elaboración propia según bases de datos SCOPUS, SpringerLink, ScienceDirect, Latindex, Scielo y Redalyc.

Hay otros métodos para evaluar de manera cuantitativa el EP como el *desempeño de los lugares* (Whyte, 1980), el *índice de buen espacio público* (Mehta, 2007), la *herramienta de espacios verdes de vecindario* (Gidlow et al., 2012), el *índice de espacio público* (Mehta, 2014), el *modelo de evaluación del espacio público en centros históricos* (Wojnarowska, 2016), la *herramienta de puntuación del entorno natural* (Gidlow et al., 2018) y el *índice de calidad del espacio público* (Pratiya y Garg, 2019).

Los métodos propuestos por [Gidlow et al., 2012](#), [Gidlow et al., 2018](#) están enfocados en la evaluación de espacios verdes, pero se tuvieron en cuenta porque sirven para adaptar procesos y actividades que guardan similitud con los EP construidos, en especial los relacionados con la evaluación de las obras de mejoramiento y su potencial para aportar en la efectividad de dichas intervenciones ([Fongar et al., 2019](#), [World Health Organization \(WHO\), 2017](#)).

En la tabla 3 se sintetizan estos métodos multidimensionales y multivariados para evaluar cuantitativamente la calidad del EP; se resumen las diferentes dimensiones de calidad consideradas en los modelos citados. Estos abarcan aspectos funcionales como confort, seguridad, accesibilidad y usos, es decir, se enfocan en la satisfacción de los propósitos o funciones del EP.

En la tabla 4 se presentan las dimensiones y variables identificadas en los métodos que describen los elementos de infraestructura y se asignan a los grupos de injerencia directa (A) e indirecta (B), según la metodología propuesta por los autores de este trabajo.

Elementos como la iluminación, el estado de los recipientes de basura y el ruido se repiten en los métodos revisados. Variables como la accesibilidad y el confort tienen mayor relación con los ODS asociados con el EP, pues la accesibilidad garantiza el uso y disfrute por todos los usuarios y el confort incrementa su tiempo de permanencia para satisfacer necesidades como comer, hidratarse, sentarse y descansar. Estas necesidades demandan seguridad y lugares específicos ([Carr et al., 1992](#)). En cuanto a las actividades y comportamientos, solo se tuvo en cuenta su variedad sin un análisis detallado. El ODS10 sobre reducción de las desigualdades está directamente afectado por muchas de las variables; esto es coherente, pues se trata de desarrollar EP de buena calidad y mantenerlo en

Tabla 3. Caracterización de los métodos cuantitativos de evaluación del EP

Método y autor	Dimensiones de calidad	Ponderación de las dimensiones	Incluye atributos de infraestructura	Aplicaciones
Desempeño de los lugares Whyte, 1980	Confort e imagen. Acceso y vinculaciones. Usos y actividades. Sociabilidad.	Todas las dimensiones tienen el mismo peso en la evaluación.		Cualquier lugar Estudio de caso: Medellín (Colombia): Arteaga Rosero, 2018 lo aplicó en una operación urbana en sectores marginales e introdujo indicadores cuantitativos para las dimensiones.
Índice de buen espacio público Good Public Space Index (Mehta, 2007)	Sensibilidad y diversidad.	Todas las dimensiones tienen el mismo peso en la evaluación		Cualquier lugar.
Herramienta de espacios verdes de vecindario Gidlow et al., 2012	Accesibilidad. Instalaciones recreativas. Servicios/amenidades. Características naturales. Incivilidad/descortesía.	Las dimensiones tienen pesos diferentes.	X	Entornos naturales de nivel de vecindario.
Índice de espacio público Public Space Index (PSI) Mehta, 2014	Inclusión. Actividades significativas. Confort. Seguridad. Agradabilidad.	Todas las dimensiones tienen el mismo peso, pero el número de variables oscila entre 42 y 45 según el caso.	X	Cualquier lugar Estudios de caso: Pensacola (Florida, EE. UU.): Evans et al., 2019 modificaron algunos indicadores considerando la diversidad y tamaño de población en áreas con mayor diversidad de EP de interés Indonesia: Siregar, 2014 indica que la condición del EP se correlaciona con los impactos negativos de la movilidad motorizada como accidentalidad y contaminación.
Modelo de evaluación del espacio público en centros históricos Wojnarowska, 2016	Composición, legibilidad, imagen, carácter, continuidad y recinto. Vitalidad, flexibilidad, adaptabilidad, usos, actividades y diversidad. Confort, satisfacción de necesidades, conveniencia. Accesibilidad, permeabilidad, vínculos y facilidad de movimiento. Seguridad y control.	Todas las dimensiones tienen el mismo peso en la evaluación, pero el método permite comparar el efecto de las diferentes dimensiones consideradas.	X	Centros históricos de ciudades con menos de 100 000 habitantes. Los centros históricos son lo más representativo, atractivo y legible de la estructura urbana. Son responsables de múltiples actividades y funciones urbanas.
Herramienta de puntuación del entorno natural Gidlow et al., 2018	Accesibilidad. Instalaciones recreativas. Servicios. Estética: características naturales y no naturales. Incivilidad. Características naturales significativas. Idoneidad de uso.	Las dimensiones tienen pesos diferentes.	X	Entornos naturales de nivel de vecindario.
Índice de calidad del espacio público Public Space Quality Index (PSQI) Praliya y Garg, 2019.	Accesibilidad y conexiones. Mantenimiento. Atractivo. Confort. Inclusión. Actividades y usos. Propósito. Seguridad y protección.	Incluye el cálculo de un promedio ponderado para cada atributo de calidad, el cual varía según el número de atributos por dimensión.	X	Cualquier lugar. Considera elementos tangibles y la percepción de los usuarios sobre el manejo de basuras y el vandalismo.

Fuente: Elaboración propia a partir de los autores citados.

Tabla 4. Incidencia entre las variables de evaluación y los ODS relacionados con el EP

Dimensión	Variables relacionadas con la infraestructura identificadas en los métodos de evaluación	Salud y bienestar	Igualdad de género	Energía asequible y no contaminante	Trabajo decente y crecimiento económico	Reducción de las desigualdades	Ciudades y comunidades sostenibles	Acción por el clima	Vida de ecosistemas terrestres
		ODS3	ODS5	ODS7	ODS8	ODS10	ODS11	ODS13	ODS15
Accesibilidad	Facilidad de desplazamiento peatonal, sin barreras físicas o perceptivas y calles fáciles de cruzar	A	B	B	B	A	A	B	B
	Accesibilidad para el transporte público	A	B	A	A	A	A	A	B
	Prioridad del paso de peatones sobre tráfico vehicular. Soluciones de tráfico calmado	A	B	B	B	A	A	B	B
	Rutas de bicicleta seguras y fáciles de usar	A	B	A	B	A	A	B	B
	Cantidad y calidad de los andenes. Acceso igualitario e integrado para personas con movilidad reducida	A	B	B	B	A	A	A	B
	Conectividad de las rutas para peatones y bicicletas. Rutas alternativas: cruces peatonales o atajos	A	B	A	B	A	A	B	B
Agradabilidad	Ejes visuales, hitos urbanos o conexión visual y física a calles y edificios adyacentes	B	B	B	A	A	A	B	B
	Cantidad y variedad de elementos que proporcionan complejidad sensorial	A	B	B	A	A	B	A	A
	Diversidad de lugares para sentarse, conversar o permitir el aislamiento del usuario	A	A	B	B	A	B	A	B
Confort	Provisión / localización / calidad de: asientos y bancas; mesas; canecas; portabicicletas; luminarias	A	A	B	B	A	A	B	B
	Comodidad climática del espacio: refugio, sombra y presencia de agua	A	B	A	B	A	A	A	A
	Disposición de asientos provistos de sombra según generadores de actividades	A	B	A	A	A	A	A	A
	Espacios públicos diseñados para adultos mayores y personas con movilidad reducida	A	B	B	B	A	A	B	B
Desarrollo sostenible	Provisión/distribución/calidad de: zonas verdes; árboles/arbustos/plantas; flores/jardines; agua	A	B	A	B	A	A	A	A
	Control de viento y ruido	A	B	A	A	B	A	A	A
	Superficies permeables y sistemas de drenaje para una máxima infiltración	A	B	A	B	B	A	A	A
	Soluciones de ahorro energético	B	B	A	B	B	A	A	A
Mantenimiento	Gestión de basura (sin evidencia de basura, desechos de alcohol, drogas)	A	A	B	A	A	A	B	B
	Estado canecas	A	A	B	A	A	A	B	B
	Zonas verdes	A	A	B	A	A	A	A	A
Dimensión	Infraestructura	A	A	B	A	A	A	A	A
	Rutas de bicicleta y andenes	A	A	B	A	A	A	A	A
	Gestión de grafiti y vandalismo	A	A	B	A	A	A	B	B
	Visibilidad lejana y cercana	A	A	B	A	B	A	B	B
Seguridad	Señalización para facilitar la orientación en el lugar	A	A	B	A	A	A	B	B
	Iluminación adecuada	A	A	A	A	A	A	A	B
	Todas las áreas tienen usos asignados y buena visibilidad (sin rincones o lugares ocultos a la vista)	A	A	A	A	A	A	A	B
	Idoneidad en el uso, disposición y diseño del espacio para diferentes actividades	A	B	B	A	A	A	A	A
Versatilidad	Cantidad y calidad de equipos/instalaciones para diferentes actividades y juegos	A	B	A	A	A	A	A	B
	Variedad de actividades y comportamientos	A	A	A	A	A	B	A	B
	Flexibilidad espacial y funcional	A	B	A	A	A	B	A	B

Fuente: Elaboración propia según las variables identificadas en (Praliya y Garg, 2019, Wojnarowska, 2016, Gidlow et al., 2012, Mehta, 2014, Mehta, 2007, Whyte, 1980, Gidlow et al., 2018)

tal condición a lo largo del tiempo, sin distinciones de ninguna clase de acuerdo con el entorno de implantación.

DISCUSIÓN

Se reconoce ampliamente la existencia de muchos beneficios en la provisión y uso del EP en áreas urbanas, y literatura extensa sobre la evaluación de la calidad del EP y la necesidad subyacente de dicha medición. Si bien hay indicadores del EP en cantidad y accesibilidad, hasta el momento no se han combinado con evaluación de la calidad por la dificultad metodológica de hacerlo (Smith *et al.*, 2014).

De otro lado, la evaluación debe considerarse en términos espaciales y correlacionados con otros datos, como la distribución y tamaño de los EP, las características de sus entornos, o datos operacionales como accidentalidad, debido al incremento de la rugosidad y la reducción de la oferta de fricción superficial por falta de mantenimiento (García de Quevedo Najjar *et al.*, 2018). Los mecanismos de evaluación basados en mapas e implementación de nuevas tecnologías para el análisis y gestión de datos facilitan el manejo del volumen de información que se recopila. También, varían si se realizan mediante inspección en campo, es decir observación directa de sus elementos, o con evaluación remota utilizando Google Earth y Google Street View (Szczepańska y Pietrzyk, 2020), ya que esta ofrece información limitada sobre la presencia, ausencia o cantidad de elementos, y pasa por alto detalles como la presencia de basura y el estado de las instalaciones; sin embargo, es más útil cuando la seguridad es motivo de preocupación en algunos sectores o cuando se requieren estudios de EP que incluyen varias ciudades o países porque la investigación resulta menos costosa (Gidlow *et al.*, 2018, Pliakas *et al.*, 2017).

El aumento de la diversidad social y cultural de los habitantes, las nuevas actividades económicas e inversiones, el incremento de turistas, población flotante y recepción de población extranjera también trae transformaciones en el EP (Pradel Miquel y Climent San Juan, 2018); las ciudades con espacios limitados para la recreación experimentan un alto grado de presión en términos de uso y constituyen un reto para la gestión del EP (Chan *et al.*, 2018).

He *et al.*, 2020 sintetizaron las limitaciones en la investigación sobre la evaluación cuantitativa de la calidad del EP concluyendo que a) la validez de los estudios de caso está restringida a tipos específicos de lugar, b) la superposición de criterios dificulta la comparación entre los métodos propuestos, c) predominan las evaluaciones cualitativas sobre las cuantitativas, y d) las evaluaciones cuantitativas no son sistemáticas y objetivas.

Los métodos de evaluación propuestos por Whyte, 1980 y Mehta, 2007, Mehta, 2014 consideran la evaluación y ponderación de elementos intangibles para establecer una calificación de cada EP. En contraste, el modelo propuesto por Wojnarowska, 2016 califica ciudades y establece un índice general para comparar la calidad del EP que permite identificar las ciudades líderes, las características que determinan su alta puntuación o sus necesidades de mejora. El índice de calidad del espacio públi-

co (Praliya y Garg, 2019) puede ser aplicado en cualquier tipo de EP, es de fácil comprensión y permite incluir otros parámetros para evaluar la calidad; no obstante, requiere la realización de numerosas encuestas, lo cual dificulta su implementación. Los únicos métodos que abordaron ponderación de los atributos de calidad fueron los propuestos por Praliya y Garg, 2019 y Gidlow *et al.*, 2012, Gidlow *et al.*, 2018, los demás dan el mismo peso para todas las dimensiones sin considerar variaciones según el número de elementos que los componen. El *índice de calidad del espacio público* (Praliya y Garg, 2019) incluye el cálculo de un promedio ponderado para cada atributo, el cual varía según el número de variables por atributo; en cambio, la *herramienta de espacios verdes de vecindario* (Gidlow *et al.*, 2012) propone una ponderación de las dimensiones según la importancia relativa percibida por los usuarios a través de encuestas, asignando a cada dimensión un porcentaje máximo sobre el puntaje total a partir de los elementos que constituyen los EP. Se requiere una línea de investigación enfocada en superar estas limitaciones, cuyas dimensiones y variables tengan un peso diferente, tal como lo plantea Varna, 2014 considerando la necesidad de priorizar dimensiones e indicadores.

Los métodos propuestos por Gidlow *et al.*, 2012, Gidlow *et al.*, 2018 están basados en la presencia, cantidad y condición de los elementos del EP, como la accesibilidad, las instalaciones recreativas, la señalización, el incivismo y la idoneidad en el uso que permiten una medición objetiva, porque se basan en la presencia y funcionamientos de instalaciones; otros, como la estética, el mantenimiento y la seguridad, están basados en la percepción de los usuarios e implican un grado de subjetividad. También, incluyen elementos adicionales de caracterización según el uso y una clasificación a partir del propósito principal y secundario de los lugares. Estos métodos se desarrollaron con grupos focales, aportes de expertos y pruebas de campo en ciudades europeas.

La complejidad de los métodos radica en la cantidad de elementos por evaluar y su posibilidad para ser utilizados en todo tipo de EP; sin embargo, la escala más pequeña y una función definida hacen que la evaluación sea más sencilla y rápida en los espacios de nivel vecinal, en comparación con los grandes EP que atraen visitantes desde más lejos. Por tanto, no es apropiado evaluar la calidad de estas dos clasificaciones utilizando los mismos criterios (Gidlow *et al.*, 2012): especificidad que confiere mayor validez en la medición de la calidad porque se estandariza los elementos a evaluar

Los métodos consultados son dispendiosos, costosos, requieren conocimientos especializados, encuestas, observaciones periódicas para analizar actividades y comportamientos diarios, mensuales y anuales en el EP. Asimismo, las observaciones varían según el contexto cultural y las necesidades de los usuarios; la percepción de calidad difiere entre los grupos de usuarios. La dificultad radica en el uso de métodos de medición basados en características cualitativas, como el confort de los peatones que, aunque es difícil de cuantificar debido a su naturaleza, cantidad e interdependencia (Reiter y De Herde, 2003), Freire *et al.*, 2020 propusieron un método basado en indicadores cuantitativos para reducir el sesgo y subjetividad en la evaluación de espacios peatonales en Ambato (Ecuador).

El cumplimiento de los ODS plantea desafíos para los gobiernos locales en cuanto a la gestión de los EP, entre ellos seleccionar las estrategias e intervenciones que tengan mayor impacto en el número de objetivos y metas (Daniel, 2016); registrar metas concretas y medibles facilita llevar a cabo

acciones. La gestión del EP, como tema de agenda política, asegura la interacción de iniciativas mundiales, nacionales con respuestas locales y configura una política más efectiva, integrada y receptiva a las circunstancias particulares de las ciudades. Contar con un método cuantitativo para evaluar la calidad del EP puede facilitar la realización de un diagnóstico técnico del estado de sus elementos; especialmente, cuando se trata de maximizar el uso de los datos recopilados, ya que sin estos no hay evidencia de la calidad de los EP.

En el marco de los ODS, la gestión del EP está encaminada a mantener y mejorar la calidad del EP en beneficio de los usuarios, la creación y conservación de lugares inclusivos, multifuncionales y visitados. Este proceso exige conocer la problemática de los EP, las condiciones que afectan su calidad y formular un marco de evaluación para encontrar soluciones acordes con el contexto y los recursos disponibles. Para ello, el uso de métodos cuantitativos de evaluación de la calidad con participación de la comunidad facilita este proceso. Aunque la subjetividad dificulta determinar hasta qué punto un espacio cumple con condiciones de calidad (Fongar *et al.*, 2019, Dempsey y Burton, 2012), los usuarios tienen claro lo que esperan de un lugar de buena calidad, como la diversidad de actividades, las oportunidades de juego, la variedad sensorial, el confort de su mobiliario y el aseo del lugar; existe un vínculo entre el mantenimiento, la calidad percibida y el uso de los EP con repercusión en el incremento de usuarios y en la decisión de invertir. Incluso los residentes locales pueden contribuir en la evaluación de los EP, reportando deterioros, participando en la formulación de los presupuestos y en la priorización de las obras (World Health Organization (WHO), 2017); la participación de la comunidad vincula la evaluación y la acción de manera más directa (Smith *et al.*, 2014).

CONCLUSIONES

Los métodos revisados incluyen una evaluación sin desagregación de la calidad de los elementos individuales que constituyen el espacio público (EP). Cuando estos métodos se ponen a prueba en espacios complejos, es pertinente una zonificación por unidades y una cuantificación de los parámetros de ponderación para cada dimensión y atributo de la calidad del EP en análisis desagregados en unidades menores, lo cual evidencia un desafío para diseñar instrumentos de evaluación para todo tipo de EP.

Los avances en métodos cuantitativos de evaluación son un aporte en la gestión del EP como disciplina. Empero, se requiere fomentar en los ámbitos académico y político, la práctica de la gestión y la formación de profesionales preparados para enfrentar estos retos. La práctica tradicional es construir nuevos espacios o remodelar los existentes, sin considerar la financiación para el mantenimiento de todo el sistema en operación. La información obtenida del análisis de estos métodos permite verificar la correspondencia entre la planeación urbana y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), de esta manera orientar el futuro de los EP. Así, las inversiones se destinan al aumento de la calidad de los espacios existentes y una mejor concepción de los nuevos.

Se abre la posibilidad de investigar en el desarrollo de herramientas con métodos objetivos que faciliten una evaluación periódica del EP, sin necesidad de habilidades específicas y brinden indicadores comparables con otros sectores, ciudades y países; con participación de los usuarios en la priorización de las inversiones y en la validación social de métodos de evaluación basados en la ponderación de los elementos que componen el EP.

FINANCIAMIENTO

Este estudio fue financiado por la Convocatoria para el fortalecimiento de la investigación, creación e innovación articulado con la formación en la Universidad Nacional de Colombia 2020-202, modalidad única. Aprobación del proyecto "Teoría y realidad sobre la gestión de espacios públicos en ciudades latinoamericanas", Código Hermes 55014.

REFERENCIAS

- [Akbari *et al.*, 2015] Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A. L., Rossi, F., Santamouris, M., Synnef, A., Wong, N. H. y Zinzi, M. (2015). Local climate change and urban heat island mitigation techniques – The state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(1), 1-16. <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1111934> ↑Ver página 148
- [Arteaga Rosero, 2018] Arteaga Rosero, A. (2018). Espacio público: una aproximación conceptual. *Módulo Arquitectura CUC*, 19(1), 69-78. <https://doi.org/10.17981/moducuc.19.1.2017.04> ↑Ver página 150
- [Barton *et al.*, 2020] Barton, D. N., Gulsrud, N., Kabisch, N. y Randrup, T. B. (2020). Urban open space valuation for policymaking and management. En M. Jansson y T. B. Randrup (eds.), *Urban open space governance and management* (pp. 129-147). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429056109-10> ↑Ver página 144
- [Borja y Muxí, 2003] Borja, J. y Muxí, Z. (2003). *El espacio público, ciudad y ciudadanía*. Editorial Electa. ↑Ver página 144, 146
- [Carmona *et al.*, 2008] Carmona, M., De Magalhães, C. y Hammond, L. (2008). *Public space: The management dimension*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203927229> ↑Ver página 145, 148
- [Carmona *et al.*, 2019] Carmona, M., Hanssen, G. S., Lamm, B., Nylund, K., Saglie, I.-L. y Tietjen, A. (2019). Public space in an age of austerity. *Urban Design International*, 24(4), 241-259. <https://doi.org/10.1057/s41289-019-00082-w> ↑Ver página 144, 145
- [Carr *et al.*, 1992] Carr, S., Francis, M., Rivlin, L. y Stone, A. (1992). *Public space*. Cambridge University Press. ↑Ver página 149

- [Carrión, F. y Dammert-Guardia, 2019] Carrión, F. y Dammert-Guardia, M. (2019). Introducción. El derecho a la ciudad: una aproximación. En *Derecho a la ciudad: Una evocación de las transformaciones urbanas en América Latina* (pp. 9-21). (1.ª ed.). Clacso, Flacso – Ecuador, IFEA. <https://doi.org/10.2307/j.ctvt6rm0z> ↑Ver página 147
- [Center for an Urban Future (CUF), 2018] Center for an Urban Future (CUF). (2018). *A new leaf. Revitalizing New York City's aging parks infrastructure*. <https://nycfuture.org/research/a-new-leaf> ↑Ver página 145
- [Creswell, 2014] Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative and mixed methods approaches*. 4.ª ed. SAGE. ↑Ver página 146
- [Chan et al., 2018] Chan, C.-S., Si, F. H. y Marafa, L. M. (2018). Indicator development for sustainable urban park management in Hong Kong. *Urban Forestry & Urban Greening*, 31, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.01.025> ↑Ver página 145, 152
- [Daniel, 2016] Daniel, K. (2016). *Espacios públicos. Una herramienta clave para lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Health Bridge. http://healthbridge.ca/images/uploads/library/Public_Spaces_ES_Electronic.pdf ↑Ver página 148, 153
- [De Magalhães y Carmona, 2009] De Magalhães, C. y Carmona, M. (2009). Dimensions and models of contemporary public space management in England. *Journal of Environmental Planning and Management*, 52(1), 111-129. <https://doi.org/10.1080/09640560802504704> ↑Ver página 145
- [Dempsey y Burton, 2012] Dempsey, N. y Burton, M. (2012). Defining place-keeping: The long-term management of public spaces. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(1), 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2011.09.005> ↑Ver página 144, 145, 146, 154
- [Duivenvoorden et al., 2020] Duivenvoorden, E., Hartmann, T., Brinkhuijsen, M. y Hesselmanns, T. (2020). Managing public space – A blind spot of urban planning and design. *Cities*, 109, 103032. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103032> ↑Ver página 145, 146
- [Evans et al., 2019] Evans, J., Evans, S. Z., Morgan, J. D., Snyder, J. A. y Abderhalden, F. P. (2019). Evaluating the quality of mid-sized city parks: A replication and extension of the Public Space Index. *Journal of Urban Design*, 14, 119-136. <https://doi.org/10.1080/13574809.2017.1411185> ↑Ver página 150
- [Fongar et al., 2019] Fongar, C., Randrup, T. B., Wiström, B. y Solfeld, I. (2019). Public urban green space management in Norwegian municipalities: A managers' perspective on place-keeping. *Urban Forestry & Urban Greening*, 44, 126438. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126438> ↑Ver página 145, 149, 154

- [Freire *et al.*, 2020] Freire, M., Campoverde, C., Puga, E., La Rota, J. y Jara, P. (2020). *Método para evaluar espacios peatonales urbanos y su aplicación en Ambato, Ecuador*. Universidad Tecnológica Indoamérica, Grupo FARO. ↑Ver página 153
- [French *et al.*, 2019] French, E. L., Birchall, S. J., Landman, K. y Brown, R. D. (2019). Designing public open space to support seismic resilience: A systematic review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 34, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.11.001> ↑Ver página 148
- [García de Quevedo Najar *et al.*, 2018] García de Quevedo Najar, F., González Pérez, M. G. y Asprilla Lara, Y. (2018). Determinación de los componentes entrópicos de la accidentalidad: el trinomio vehículo/usuario/camino en la metrópoli de Guadalajara, México. *Tecnura*, 22(5), 51-65. <https://doi.org/10.14483/22487638.13245> ↑Ver página 152
- [Gehl, 2014] Gehl, J. (2014). *Ciudades para la gente*. Ediciones Infinito. ↑Ver página 144
- [Gidlow *et al.*, 2012] Gidlow, C., Ellis, N. J. y Bostock, S. (2012). Development of the neighbourhood green space tool (NGST). *Landscape and Urban Planning*, 106(4), 347-358. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.04.007> ↑Ver página 149, 150, 151, 153
- [Gidlow *et al.*, 2018] Gidlow, C., Van Kempen, E., Smith, G., Triguero-Mas, M., Kruize, H., Gražulevičienė, R., Ellis, N., Hurst, G., Masterson, D., Cirach, M., Van den Berg, M., Smart, W., Dèdelè, A., Maas, J. y Nieuwenhuijsen, M. J. (2018). Development of the natural environment scoring tool (NEST). *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 322-333. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.12.007> ↑Ver página 149, 150, 151, 152, 153
- [Giles-Corti *et al.*, 2005] Giles-Corti, B., Broomhall, M. H., Knuiaman, M., Collins, C., Douglas, K., Ng, K., Lange, A. y Donovan, R. J. (2005). Increasing walking. *American Journal of Preventive Medicine*, 28(2), 169-176. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2004.10.018> ↑Ver página 148
- [Haase *et al.*, 2020] Haase, D., Pauleit, S. y Randrup, T. B. (2020). Urban open spaces and the urban matrix: Elements, form, and functions. En M. Jansson y T. B. Randrup (eds.), *Urban open space governance and management* (pp. 30-50). Routledge, Taylor & Francis Group. ↑Ver página 144
- [He *et al.*, 2020] He, P., Herthogs, P., Cinelli, M., Tomarchio, L. y Tunçer, B. (2020). A multi-criteria decision analysis based framework to evaluate public space quality. En R. Roggema y A. Roggema (eds.), *Smart and sustainable cities and buildings* (pp. 271-283). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37635-2_18 ↑Ver página 147, 152
- [Herthog *et al.*, 2018] Herthogs, P., Tunçer, B., Schläpfer, M. y He, P. (2018). A weighted graph model to estimate people's presence in public space. The visit potential model. *Simulation, Prediction & Evaluation*, 2(eCAADe 2018), 611-620. ↑Ver página 145, 147

- [Ho *et al.*, 2020] Ho, D., Lai, L. y Wang, A. (febrero de 2020). The effects of 'publicness' and quality of publicly accessible open space upon user satisfaction. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 0(0), 1-19. [↑Ver página 148](#)
- [Hurtubia *et al.*, 2015] Hurtubia, R., Guevara, A. y Donoso, P. (2015). Using images to measure qualitative attributes of public spaces through SP surveys. *Transportation Research Procedia*, 11, 460-474. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.12.038> [↑Ver página 146](#)
- [Isabeles Deniz *et al.*, 2019] Isabeles Deniz, K. G., Olavarría Sánchez, A. M., Quintanilla Montoya, A. L. y Ríos Aguilar, J. (2019). Adecuación metodológica para el manejo de aguas pluviales en la Ciudad de Colima, México. *Tecnura*, 23(62), 55-72. <https://doi.org/10.14483/22487638.15452> [↑Ver página](#)
- [Jansson *et al.*, 2020] Jansson, M., Vogel, N., Fors, H., Dempsey, N., Buijjs, A. E. y Randrup, T. B. (2020). Defining urban open space governance and management. En M. Jansson y T. B. Randrup (eds.), *Urban open space governance and management* (pp. 11-29). Routledge, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.4324/9780429056109-3> [↑Ver página 145](#)
- [Kimpton, 2017] Kimpton, A. (2017). A spatial analytic approach for classifying greenspace and comparing greenspace social equity. *Applied Geography*, 82, 129-142. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.03.016> [↑Ver página 148](#)
- [Koren y Rus, 2019] Koren, D. y Rus, K. (2019). The potential of open space for enhancing urban seismic resilience: A literature review. *Sustainability*, 11(21), 5942. <https://doi.org/10.3390/su11215942> [↑Ver página 148](#)
- [Lee, 2021] Lee, S. (2021). The safety of public space: Urban design guidelines for neighborhood park planning. *Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability*, 15(2), 222-240. <https://doi.org/10.1080/17549175.2021.1887323> [↑Ver página 148](#)
- [Lee y Maheswaran, 2011] Lee, A. C. K. y Maheswaran, R. (2011). The health benefits of urban green spaces: A review of the evidence. *Journal of Public Health*, 33(2), 212-222. <https://doi.org/10.1093/pubmed/fdq068> [↑Ver página 148](#)
- [León Agatón *et al.*, 2016] León Agatón, A., Córdoba Ruiz, J. C. y Carreño Sayago, U. F. (2016). Revisión del estado de arte en captación y aprovechamiento de aguas lluvias en zonas urbanas y aeropuertos. *Tecnura*, 20(50), 141-153. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a10> [↑Ver página](#)
- [Lee *et al.*, 2015] Lee, A. C. K., Jordan, H. C. y Horsley, J. (2015). Value of urban green spaces in promoting healthy living and wellbeing: Prospects for planning. *Risk Management and Healthcare Policy*, 8, 131-137. <https://doi.org/10.2147/RMHP.S61654> [↑Ver página 148](#)

- [Light y Smith, 1998] Light, A. y Smith, J. M. (eds.). (1998). *Philosophy and Geography II: The production of public space*. Rowman & Littlefield Publishers, Inc. ↑Ver página 146
- [Madanipour, 2019] Madanipour, A. (2019). Rethinking public space: Between rhetoric and reality. *Urban Design International*, 24(1), 38-46. <https://doi.org/10.1057/s41289-019-00087-5> ↑Ver página 144, 148
- [Mattijssen *et al.*, 2017] Mattijssen, T. J. M., Van der Jagt, A. P. N., Buijs, A. E., Elands, B. H. M., Erlwein, S. y Laforteza, R. (2017). The long-term prospects of citizens managing urban green space: From place making to place-keeping? *Urban Forestry & Urban Greening*, 26, 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.05.015> ↑Ver página 145, 146
- [Mehta, 2007] Mehta, V. (2007). A toolkit for performance measures of public space. En *Performance Measures of Public Space, 43rd ISOCARP Congress 2007* (pp. 1-9). http://www.isocarp.net/Data/case_studies/983.pdf ↑Ver página 149, 150, 151, 152
- [Mehta, 2014] Mehta, V. (2014). Evaluating public space. *Journal of Urban Design*, 19(1), 53-88. <https://doi.org/10.1080/13574809.2013.854698> ↑Ver página 149, 150, 151, 152
- [Nam y Dempsey, 2019] Nam, J. y Dempsey, N. (2019). Place-keeping for health? Charting the challenges for urban park management in practice. *Sustainability*, 11(16), 4383. <https://doi.org/10.3390/su11164383> ↑Ver página 145, 148
- [Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2015] Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/> ↑Ver página 146
- [Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2017] Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2017). *Nueva agenda urbana*. Secretaría de Hábitat III. <http://habitat3.org/wp-content/uploads/NUA-Spanish.pdf> ↑Ver página 146
- [Osorio Guzmán *et al.*, 2020] Osorio Guzmán, A. M., Chedid Sivestre, F. A., Sayuri Yamamura, J., Klug Heinzen, M. y Alves Frazon, N. (2020). Urban spaces sustainability. Applied study to Curitiba's Central District—Brazil. En W. Leal Filho, U. Tortato, F. Frankenberger (eds.), *Universities and sustainable communities: Meeting the goals of the agenda 2030* (pp. 465-478). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30306-8_28 ↑Ver página 148
- [Páramo y Burbano, 2013] Páramo, P. y Burbano, A. M. (2013). Valoración de las condiciones que hacen habitable el espacio público en Colombia. *Territorios*, 28, 187-206. ↑Ver página 148
- [Pliakas *et al.*, 2017] Pliakas, T., Hawkesworth, S., Silverwood, R. J., Nanchahal, K., Grundy, C., Armstrong, B., Casas, J. P., Morris, R. W., Wilkinson, P. y Lock, K. (2017). Optimising measurement of health-related characteristics of the built environment: Comparing data collected by foot-based

- street audits, virtual street audits and routine secondary data sources. *Health & Place*, 43, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2016.10.001> ↑Ver página 152
- [Pradel Miquel y Climent San Juan, 2018] Pradel Miquel, M. y Climent San Juan, V. (2018). Transformaciones del modelo de gestión del espacio público de Barcelona. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales (CyTET)*, 50(196), 235-248. ↑Ver página 152
- [Praliya y Garg, 2019] Praliya, S. y Garg, P. (2019). Public space quality evaluation: Prerequisite for public space management. *The Journal of Public Space*, 4(1), 93-126. <https://doi.org/10.32891/jps.v4i1.667> ↑Ver página 149, 150, 151, 153
- [Rakhshandehroo *et al.*, 2017] Rakhshandehroo, M., Mohd Yusof, M. J., Arabi, R., Parva, M. y Nochian, A. (2017). The environmental benefits of urban open green spaces. *Alam Cipta, International Journal on Sustainable Tropical Design Research & Practice*, 10(1), 10-16. ↑Ver página 148
- [Ranjha, 2018] Ranjha, S. (2018). *Maintenance of neighbourhood parks. Perspective from resident welfare association presidents in East Delhi, India* [Tesis doctoral, Technische Universität Dresden]. Repositorio de la Technische Universität Dresden. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-355033> ↑Ver página 145
- [Reiter y De Herde, 2003] Reiter, S. y De Herde, A. (2003). Qualitative and quantitative criteria for comfortable urban public spaces. En J. Carmeliet, H. Hens y G. Vermeir (eds.), *Research in building physics* (pp. 1001-1009). Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781003078852-140> ↑Ver página 153
- [Salgado Lévano, 2007] Salgado Lévano, A. C. (2007). Investigación cualitativa: diseños, evaluación del rigor metodológico y retos. *Liberabit, Revista Peruana de Psicología*, 13, 71-78. ↑Ver página 146
- [Salih y Ismail, 2017] Salih, S. A. y Ismail, S. (2017). Criteria for public open space enhancement to achieve social interaction: A review paper. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 291, 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/291/1/012001> ↑Ver página 148
- [Siregar, 2014] Siregar, J. P. (2014). Assessment of public space quality using good public space index (Case Study of Merjosari Sub District, Municipality of Malang, Indonesia). *Procedia, Social and Behavioral Sciences*, 135, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.07.318> ↑Ver página 150
- [Smith *et al.*, 2014] Smith, H., Pereira, M., Roe, J., Sosenko, F., Lindholst, A. C. y Mathers, A. (2014). The evaluation of place-keeping. Unrealised potential. En N. Dempsey, H. Smith y M. Burton (eds.), *Place-keeping open space management in practice* (pp. 151-172). Routledge. ↑Ver página 145, 152, 154

- [Sundevall y Jansson, 2020] Sundevall, E. P. y Jansson, M. (2020). Inclusive parks across ages: Multifunction and urban open space management for children, adolescents, and the elderly. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(24), 9357. <https://doi.org/10.3390/ijerph17249357> ↑Ver página 144, 148
- [Swanwick *et al.*, 2003] Swanwick, C., Dunnett, N. y Woolley, H. (2003). Nature, role and value of green space in towns and cities: An overview. *Built Environment*, 29(2), 94-106. <https://doi.org/10.2148/benv.29.2.94.54467> ↑Ver página 144
- [Szczepańska y Pietrzyk, 2020] Szczepańska, A. y Pietrzyk, K. (2020). An evaluation of public spaces with the use of direct and remote methods. *Land*, 9(11), 419. <https://doi.org/10.3390/land9110419> ↑Ver página 152
- [Tomadoni y Romero Grezzi, 2014] Tomadoni, C. y Romero Grezzi, C. (2014). El lugar como categoría de análisis del espacio público. Complejidad, (in)materialidad, resignificación y planificación del espacio público. *Gestión & Ambiente*, 17, 99-113. ↑Ver página 148
- [Varna, 2014] Varna, G. M. (2014). *Measuring public space: The star model*. (1.ª ed.). Routledge, Taylor & Francis Group. ↑Ver página 153
- [Werner y Zahner, 2010] Werner, P. y Zahner, R. (2010). Urban patterns and biological diversity: A review. En N. Müller, P. Werner, J. G. Kelcey (eds.), *Urban biodiversity and design* (pp. 145-175). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781444318654.ch7> ↑Ver página 144
- [World Health Organization (WHO), 2017] World Health Organization (WHO). (2017). *Urban green space interventions and health. A review of impacts and effectiveness*. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0010/337690/FULL-REPORT-for-LLP.pdf ↑Ver página 149, 154
- [Whyte, 1980] Whyte, W. (1980). *The social life of small urban spaces*. Project for Public Spaces. <https://www.pps.org> ↑Ver página 149, 150, 151, 152
- [Wojnarowska, 2016] Wojnarowska, A. (2016). Model for assessment of public space quality in town centers. *European Spatial Research Policy*, 23(1), 81-109. <https://doi.org/10.1515/esrp-2016-0005> ↑Ver página 145, 149, 150, 151, 152
- [Zamanifard *et al.*, 2018] Zamanifard, H., Alizadeh, T. y Bosman, C. (2018). Towards a framework of public space governance. *Cities*, 78, 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.02.010> ↑Ver página 145



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 Copernicus (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 brevemente; 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://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.xxxxxxx

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

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 indica-

dores 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, 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

Instrucciones para los autores

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/about/submissions>

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Transversal 70 B N. 73 a 35 sur

Teléfono: 571 – 3239300 Extensión: 5003

Celular: 57–3153614852

Bogotá D.C., Colombia

Email:

tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co, 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://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.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

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

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 ARBITARION 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, 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, tecnura@gmail.com
Web page:
<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>