
12 Editorial

Investigación

- 16 Evaluación de modelos de programación lineal y no lineal para la planeación de sistemas de transmisión en el software GAMS
Diego Armando Giral Ramírez, Oscar Danilo Montoya Giraldo, Carlos Yesid Vargas Robayo ,
Diego Felipe Blanco Valbuena
- 51 Producción de biodiesel a partir del aceite extraído de almendra del corozo *Bactris guineensis* asistida mediante ultrasonido de sonda directa
Juan Martín Madrid De la Rosa, Dary Mendoza Meza, Miriam Fontalvo Gómez
- 76 Modelo de programación entera mixta en la planeación de actividades y personal en un capítulo académico estudiantil
Jair Eduardo Rocha Gonzalez, Hernando Alexander Gutiérrez Sánchez, Cindy Lorena Silva Riapira
- 101 Geomicrobiología para prospección de uranio en profundidad en la cuenca Neuquina, Argentina
Adalgisa Scotti, Guillermo Rojas, Cristina Marcela Servant, Pablo Catálfamo, Nicolás Valle,
Martín Pedro Gómez
- 120 Polielectrolito catiónico como coagulante empleado para remover aceites y grasas de aguas residuales de una industria láctea
Hernando Carlos Oñate Barraza, María Alejandra Chinchilla Calderón
- 131 Reciclaje de EAFD a través de la lixiviación selectiva de zinc con soluciones de citrato: comparación con un ácido inorgánico
Johana Borda, Fabián López, Robinson Torres, Mario Parra
- 150 Flujo óptimo de potencia a través de técnicas de inteligencia artificial
Cesar Hernandez, William Sánchez Huertas, Víctor Gómez
- 171 Prototipo de cosecha inteligente de agua lluvia para mejorar la eficiencia energética residencial en Bogotá
Carlos Arturo Ramírez-Escobar, Clara Inés Buriticá-Arboleda
-

Revisión

- 196 Una revisión sistemática sobre aula invertida y aprendizaje colaborativo apoyados en inteligencia artificial para el aprendizaje de programación
José Miguel Llanos Mosquera, Carlos Giovanni Hidalgo Suarez, Víctor Andrés Bucheli Guerrero
-
- 215 Instrucciones para autores
- 288 Instructions for authors
-

Vol. 25 Núm. 69 • Julio - Septiembre de 2021 • Bogotá, Colombia • Publicación trimestral - ISSN: 0123-921X • e-ISSN-e 2248-7638

Tecnura

V.25
N.69



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica

Revista Tecnura • Volumen 25 – Número 69 • Julio - Septiembre de 2021
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 25 - Número 69
Julio - Septiembre de 2021

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. Cesar Augusto Roldan
Universidad de Veracruz, Mexico

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

Ph.D. Ing. Gustavo Gatica
Universidad Andrés, Colombia

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

Ph.D. Johanna Gomez
Universidad Industrial de Santander, Colombia

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

Ph.D. Ing. Luis Fernando Grisales Noreña
Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín,
Colombia

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

Ph.D. Oswaldo Solarte Pabón
Universidad del Valle, Colombia

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

Ph.D. Ing. Walter Julián Gil González
Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia

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

Ph.D. Ing. William Hernán Coral Cuellar
Universidad Politécnica de Madrid, España

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

M. Luis Fernando Lozano Gómez
Universidad Pedagógica y Tecnológica, Colombia

COMITÉ CIENTÍFICO

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

M.Ing. Oscar Mayorga Torres
Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia

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

M.Ing. Yoma Isabel Mendoza Guerra
Universidad de la Guajira, Colombia

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

ASISTENTES DE LA REVISTA

Lizeth Viviana Urrea

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

COORDINACIÓN EDITORIAL

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

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

Tecnura

Julio - Septiembre de 2021

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

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

EDITORIAL COMMITTEE

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

EVALUATORS

Ph.D. Ing. Cesar Augusto Roldan
Universidad de Veracruz, Mexico

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

Ph.D. Ing. Gustavo Gatica
Universidad Andrés, Colombia

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

Ph.D. Johanna Gomez
Universidad Industrial de Santander, Colombia

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

Ph.D. Ing. Luis Fernando Grisales Noreña
Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín,
Colombia

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

Ph.D. Oswaldo Solarte Pabón
Universidad del Valle, Colombia

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

Ph.D. Ing. Walter Julián Gil González
Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia

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

Ph.D. Ing. William Hernán Coral Cuellar
Universidad Politécnica de Madrid, España

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

M. Luis Fernando Lozano Gómez
Universidad Pedagógica y Tecnológica, Colombia

SCIENTIFIC COMMITTEE

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

M. Ing. Oscar Mayorga Torres
Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia

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

M. Ing. Yoma Isabel Mendoza Guerra
Universidad de la Guajira, Colombia

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

TECNURA JOURNAL ASSISTANTS

Lizeth Viviana Urrea

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

EDITORIAL COORDINATION

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

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

Tecnura

Julio - Septiembre de 2021

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.



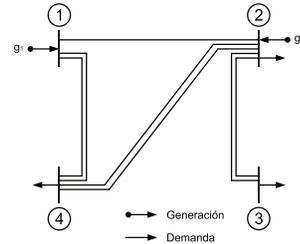
Editorial

12

Evaluation of Linear and Nonlinear Models for Transmission System Planning Using the GAMS Software 16

Evaluación de modelos de programación lineal y no lineal para la planeación de sistemas de transmisión en el *software* GAMS

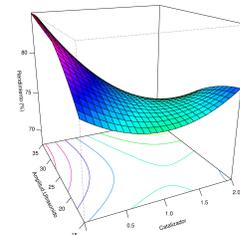
Vargas-Robayo., C.Y. Blanco-Valbuena., D.F. Montoya-Giraldo., O.D. y Giral-Ramírez., D.A,



Biodiesel Production From Almond Oil Extracted From the Corozo *Bactris Guineensis* Assisted by Direct Probe Ultrasound 51

Producción de biodiésel a partir del aceite extraído de almendra del corozo *Bactris guineensis* asistida mediante ultrasonido de sonda directa

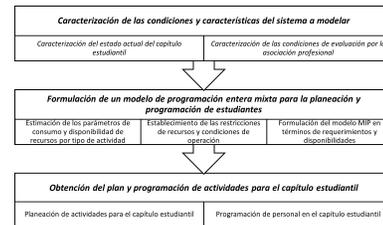
Madrid De la Rosa., J. Mendoza-Meza., D. y Fontalvo-Gómez., M.



Mixed Integer Programming Model for Activities and Personal Planning on Student Academic Chapter 76

Modelo de programación entera mixta en la planeación de actividades y personal en un capítulo académico estudiantil

Rocha-González., J.E. Gutiérrez-Sánchez., H.A. y Silva-Riapira., C.L.

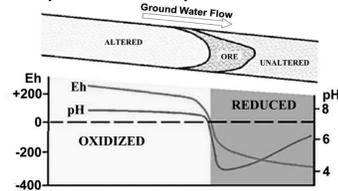


Geomicrobiology for Deep Uranium Prospection in the Neuquina Basin, Argentina 101

Geomicrobiología para prospección de uranio en profundidad en la cuenca Neuquina, Argentina

Scotti., A. Rojas., G. Servant., C.M. Catálfamo., P. Valle., N. y Gómez., M.P.

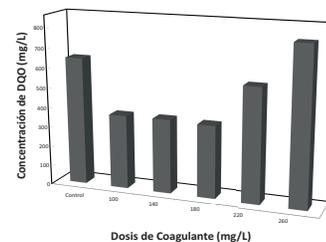
Postulated Eh-pH Conditions During Transportation and Deposition of Uranium



Cationic polyelectrolyte as a coagulant used to remove oils and fats from wastewater of a dairy industry 120

Polielectrolito catiónico como coagulante empleado para remover aceites y grasas de aguas residuales de una industria láctea

Oñate-Barraza., C.H. Y Chinchilla-Calderón., M.A.

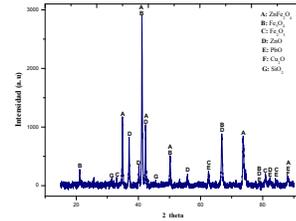




EAFD Recycling Through Selective Zinc Leaching with Citrate Solutions: Comparison with an Inorganic Acid 131

Reciclaje de EAFD a través de la lixiviación selectiva de zinc con soluciones de citrato: comparación con un ácido inorgánico

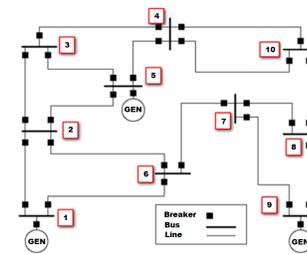
Borda., J. López., F. Torres., R. y Parra., M.



Optimal Power Flow through Artificial Intelligence Techniques 150

Flujo óptimo de potencia a través de técnicas de inteligencia artificial

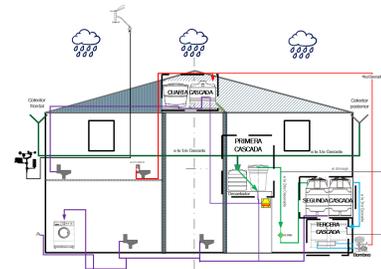
Hernández., C. Sánchez-Huertas., W. y Gómez., V.



Intelligent Rainwater Harvesting Prototype to Improve Residential Energy Efficiency in Bogota 171

Prototipo de cosecha inteligente de agua lluvia para mejorar la eficiencia energética residencial en Bogotá

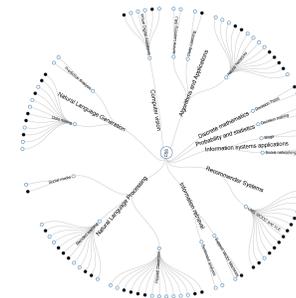
Ramírez-Escobar., C.A. y Buriticá-Arboleda., C.I.



A Systematic Review on Flipped Classroom and Collaborative Learning Supported in Artificial Intelligence for Programming Learning 196

Una revisión sistemática sobre aula invertida y aprendizaje colaborativo apoyados en inteligencia artificial para el aprendizaje de programación

Giovanny-Hidalgo., C.G. Llanos-Mosquera., J.M. y Bucheli-Guerrero., V.A.



Instrucciones para los autores 215

Instructions for authors 228

Las energías renovables están alcanzando gran importancia y su margen de penetración en muchos países ha venido aumentando, por lo que es de vital importancia conocer el comportamiento del sistema con la inclusión masiva de este tipo de generación, por sus beneficios ambientales y porque para el caso colombiano, puede llegar a convertirse en la alternativa más viable para el suministro de energía en zonas no interconectadas.

Kroposki 2017 muestra cómo la frecuencia y el voltaje son en última instancia los factores más importantes a ser considerados en el control de un sistema eléctrico. Es fundamental que éste tenga un comportamiento adecuado que permita mantener la estabilidad, seguridad y flexibilidad en pro de los consumidores, considerando el cambio de paradigma de consumo de energía en que el usuario pasa de estar en calidad de consumidor a prosumidor (quien demanda y entrega energía a la red), con lo que aumentaría el porcentaje de generación distribuida proveniente de fuentes de generación variable o intermitentes y que carecen en general de inercia mecánica.

Según la Unidad de Planeación Minero Energética UPME, Para el año 2015 el departamento de Antioquia era el que más aportaba recursos de generación eléctrica al país, con una participación del 29.54 % seguido por Cundinamarca con 14.03 % (UPME, 2016). Esta generación ha sido tradicionalmente proveniente de recursos hídricos, por lo que se establece una gran dependencia de las precipitaciones y a raíz de esto, se debe sostener la confiabilidad del sistema con generación térmica que sirva como respaldo en los escenarios de sequía y bajos niveles de precipitación. Dado que la matriz de generación tenía esta composición, el sistema de transmisión interconectado nacional ha gozado de buenos niveles de inercia; pero con la intención de minimizar en lo posible el uso de combustibles fósiles para la generación de energía, la reducción en el costo de la energía y la diversificación de la matriz de generación eléctrica, se ha visto incrementada la implementación de energías alternativas en algunas zonas del territorio nacional que serán conectadas a través de electrónica de potencia y podrían afectar los niveles de inercia en la red, un ejemplo de esto lo presenta EPM (Empresas Públicas de Medellín) que con su planta de generación solar fotovoltaica flotante ubicada en el embalse de El Peñol, con 368 paneles y una capacidad instalada de 100 kilovatios (kW), ha venido estudiando el desempeño energético de este tipo de aprovechamientos con miras a incrementarlo gradualmente. (EPM 2020). Entre algunos de los proyectos fotovoltaicos más destacables principalmente en Los Departamentos de Antioquia, Valle del Cauca Meta y Cundinamarca, entre los que se encuentran la Fábrica Nacional de Chocolates en Rionegro con una capacidad instalada de 2100 kW (Zambrano, 2018), y cerca de quinientos ya en funcionamiento que se encuentran funcionando en centros comerciales, instituciones, fincas, casas donde se cuenta instalaciones solares fotovoltaicas para asumir el consumo eléctrico de día e incluso se abastecen con este recurso desde la red en las noches cuando no hay luz solar (Zambrano, 2018).



Partiendo de lo definido por (Kroposki et al., 2017) donde se dice que la inercia de un sistema de energía eléctrica puede ser considerada como una medida de qué tan bien el sistema puede "sortear" las perturbaciones y mantener una frecuencia y un voltaje estables, se podría establecer que, bajo el escenario planteado anteriormente, la respuesta de la frecuencia ante eventos de falla o perturbaciones se puede ver seriamente afectada.

La importancia de este nuevo escenario, radica en que a medida que sean incluidos proyectos de generación alternativa y aumente el rol de prosumidor y con este la generación distribuida, se irán tornando cada vez más complejas las redes eléctricas y se necesitarán modelos que permitan seguir manteniendo su funcionamiento en condiciones óptimas de operación.

Cesar Augusto García Ubaque 

DIRECTOR

cagarcau@udistrital.edu.co

Over the years, the need to know the behavior of the electrical system has increased when it comes to massively including renewable energy generation mechanisms due to a variety of reasons. In the first place, renewable energy is reaching great importance, and the extent of its use in many countries has been increasing. Second, this energy source has broad environmental benefits. And third, renewable energy may become the most viable alternative for supplying energy in non-interconnected areas of Colombia.

Kroposki 2017 shows how frequency and voltage are ultimately the most important factors to be considered in the control of an electrical system. It is essential that the electrical system behaves in a way that allows stability, security, and flexibility to be maintained in favor of consumers; it also needs to consider the paradigm shift in which the user goes from being a consumer to being a prosumer (who demands and delivers energy to the grid). With this change, the percentage of distributed generation from variable or intermittent generation sources—which generally lack mechanical inertia, would increase.

According to the Mining-Energy Planning Unit (UPME), in 2015 the department of Antioquia was the largest contributor of electricity generation in the country, with 29.54 % participation, followed by Cundinamarca with 14.03 % (UPME, 2016). This energy has traditionally come from water resources, so there is great dependence on rainfall in the region. As a result, in seasons of drought or low rainfall it is necessary to rely on the generation of thermal energy that serves as a backup and guarantees the reliability of the system. Thanks to this design, the national interconnected transmission system has enjoyed good levels of inertia; however, the implementation of alternative energies in some areas of the territory has increased in recent years. This implementation is due to the desire to minimize the use of fossil fuels in power generation, reduce the cost, and diversify the electricity generation matrix. These zones with alternative energies would be connected through power electronics and could affect the levels of inertia in the network. For example, EPM (Public Companies of Medellín) has been studying the energy performance in its photovoltaic power generation plant located in the El Peñol dam—368 panels and an installed capacity of 100 KW and seeks to increase it gradually (EPM 2020) .

Some of the most notable photovoltaic projects are in Antioquia, Valle del Cauca, Meta, and Cundinamarca; Among these are the National Chocolate Factory in Rionegro with an installed capacity of 2,100 KW (Zambrano, 2018), in addition to approximately five hundred projects that are already operating in shopping centers, institutions, farms, or houses. In these locations there are photovoltaic solar installations to assume electricity consumption during the day and even supply at night when there is no direct sunlight (Zambrano, 2018).

From the scenario raised above and as defined by (Kroposki et al., 2017), that the inertia of an electrical power system is a measure of how well the system can cope with disturbances and maintain stable frequency and voltage, it is possible to say that the frequency response to fault events or



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Editorial

<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/issue/view/1075>

disturbances can be seriously affected. The importance of this new situation lies in the following: as the inclusion of alternative generation projects grows and the role of prosumer and distributed generation increases, energy networks will become increasingly complex and models will be needed to guarantee their operation.

Cesar Augusto García-Ubaque 

DIRECTOR

cagarciau@udistrital.edu.co

Evaluación de modelos de programación lineal y no lineal para la planeación de sistemas de transmisión en el *software* GAMS

Evaluation of Linear and Nonlinear Models for Transmission System Planning Using the GAMS Software

Carlos Yesid Vargas Robayo ¹, Diego Felipe Blanco Valbuena ², Óscar Danilo Montoya-Giraldo ³, Diego Armando Giral-Ramírez ⁴

Fecha de Recepción: 07 de Diciembre de 2020

Fecha de Aceptación: 01 de Abril de 2021

Cómo citar: Vargas-Robayo., C.Y. Blanco-Valbuena., D.F. Montoya-Giraldo., O.D. y Giral-Ramírez., D.A. (2021). Evaluación de modelos de programación lineal y no lineal para la planeación de sistemas de transmisión en el software GAMS. *Tecnura*, 25(69), 16-50. <https://doi.org/10.14483/22487638.17957>

Abstract

Objective: This work analyzes the optimal expansion cost, the number of lines to include, and the computational simulation time for two transmission systems, using mixed-integer nonlinear programming through the *solvers* of the GAMS (General Algebraic Modeling System) software. The objective is to determine the differences in expansion costs using the transport model, DC model, linear hybrid, and disjunctive linear.

Methodology: The methodology of this study is divided into five stages. The first identifies the transmission system; the second establishes the transmission system planning problem; the third performs the formulation of the power system according to each of the optimization models; the fourth applies the formulation of the power system in the GAMS software; the last selects the optimal cost.

Results: Considering the optimal cost analysis, the DC model and the disjunctive linear model present the highest optimal cost concerning the transport model and the linear hybrid model.

Conclusions: The implemented models presented equivalent performances in the test system with the smallest number of nodes; by increasing the number of nodes, the performance of the models does not present similarity. On the contrary, the results present significant differences that allow characterizing specific *solvers* according to the number of nodes.

Keywords: GAMS, power system optimization, transmission system planning, mixed-integer nonlinear programming

¹Estudiante de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D. C., Colombia. Email: cyvargasr@correo.udistrital.edu.co

²Estudiante de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D. C., Colombia. Email: dfblancov@correo.udistrital.edu.co

³Doctor en Ingeniería, magíster en Ingeniería Eléctrica, Ingeniero Electricista. Docente asistente Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D. C., Colombia. Email: odmontoyag@udistrital.edu.co

⁴Candidato a doctor en Ingeniería, magíster en Ingeniería Eléctrica, Ingeniero Eléctrico. Docente asistente Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D. C., Colombia. Email: dagiralr@udistrital.edu.co

Resumen

Objetivo: Este trabajo analiza el costo óptimo de expansión, el número de líneas a incluir y el tiempo de simulación computacional para dos sistemas transmisión, empleando programación no lineal entera mixta a través de los *solver* del *software* GAMS (General Algebraic Modeling System). El objetivo es determinar las diferencias en los costos de expansión cuando se emplea el modelo de transporte, DC, híbrido lineal y lineal disyuntivo.

Métodología: Está dividida en cinco etapas: la primera identifica el sistema de transmisión, la segunda establece el problema de planeamiento del sistema de transmisión, la tercera realiza la formulación del sistema de potencia de acuerdo con cada uno de los modelos de optimización, la cuarta aplica la formulación del sistema de potencia en el *software* GAMS y la última selecciona el costo óptimo.

Resultados: Desde el análisis de costo óptimo, el modelo DC y el modelo lineal disyuntivo presentaron el mayor costo óptimo respecto al modelo de transporte y al modelo híbrido lineal.

Conclusiones: Los modelos implementados presentaron desempeños equivalentes en el sistema de prueba con el menor número de nodos; al aumentar el número de nodos, el desempeño de los modelos no presenta similitud. Por el contrario, se identifican diferencias importantes en los resultados obtenidos, lo que permite caracterizar *solver* específicos de acuerdo con el número de nodos.

Palabras clave: GAMS, optimización de sistemas de potencia, planeamiento sistemas de transmisión, programación no lineal entera mixta.

Tabla de Contenido

	Página
Introducción	18
Modelos de optimización para OPTS	20
Modelo de transporte	20
Modelo DC	22
Modelo híbrido lineal	23
Modelo lineal disyuntivo	24
Herramientas para el modelo de OPTS	25
<i>Software</i> GAMS	26
Ejemplo del OPTS a través del lenguaje GAMS	28
Formulación del problema	29
Implementación en GAMS	30
Resultados del OPTS en GAMS	34
Metodología	35
Identificar datos del sistema de transmisión	36
Sistema de potencia Garver 6 nodos	36

Sistema de potencia Sur Brasileiro 46 nodos	37
Establecer el problema de planeamiento de la expansión del sistema de transmisión	38
Sistema de potencia Garver 6 nodos	38
Sistema de potencia Sur Brasileiro 46 nodos	38
Aplicar la formulación del sistema de transmisión en el <i>software</i> GAMS	39
Seleccionar costo óptimo	40
Resultados	40
Sistema de potencia Garver 6 nodos	41
Análisis comparativo MATLAB	42
Sistema de potencia Sur Brasileiro 46 nodos	43
Conclusiones	45
Trabajo futuro	46
Referencias	46

Introducción

Históricamente, el objetivo del planeamiento de las redes eléctricas se basaba en cumplir con la curva de demanda a un costo mínimo. Actualmente, son diversas las restricciones operativas que se deben incluir: valor de la capacidad de las fuentes de suministro, aspectos de la estabilidad, adquisición de reservas, comportamiento del almacenamiento e integración de otros sectores energéticos (Helistö *et al.*, 2019).

El planeamiento óptimo de sistemas de transmisión (OPTS, por su sigla en inglés) es un problema complejo de programación matemática no lineal (Gayibov, 2020), como se describe en la ecuación (1), donde $g(x, u)$ representa las restricciones de igualdad no lineales y restricciones de flujo de potencia, $h(x, u)$ representa las restricciones de desigualdad no lineal, límites en las variables de control y límites operativos del sistema de potencia. Las restricciones, controles y objetivos se describen en la tabla 1.

$$\begin{aligned}
 &\text{Función objetivo:} && F(\bar{x}, \bar{u}) && (1) \\
 &\text{Sujeto a las restricciones:} && g(\bar{x}, \bar{u}) = 0 \\
 & && h(\bar{x}, \bar{u}) \leq 0
 \end{aligned}$$

Como estrategias de solución para el OPTS, durante los últimos años se han propuesto diversos métodos y algoritmos (Abdin y Zio, 2019, Fathi *et al.*, 2019, Mohammadi-ivatloo y Nazari-Heris, 2019). Entre estos métodos se incluyen los de optimización convencionales (Nguyen y Santoso, 2021, Zhang,

2013), los de inteligencia de inteligencia artificial (Ruan *et al.*, 2020), los heurísticos (Lu *et al.*, 2007) y los metaheurísticos (Morquecho *et al.*, 2021, Saldarriaga-Zuluaga *et al.*, 2019). A continuación se presenta el modelo para algunas de las estrategias utilizadas para el OPTS.

Tabla 1. Características de un problema de optimización para sistemas de potencia

Restricciones de desigualdad e igualdad	Controles	Objetivo
Ecuaciones de flujo de potencia	Generación de potencia activa y reactiva	Minimizar el costo de generación
Límites de variables de control		Minimizar las pérdidas de transmisión
Carga de circuito activa y reactiva	Perfiles de tensión y generación de potencia reactiva	Minimizar las pérdidas de transmisión
Área neta de generación de potencia activa y reactiva	Ubicación de posiciones de TAP para transformadores	Minimizar la cantidad de controles reprogramados Optimizar el perfil de voltaje
Flujo de potencia activa y reactiva	Cambios de fase del transformador Intercambio neto	Minimizar la pérdida de potencia activa y reactiva del área
Capacidad de unidad Mvar	Condensadores síncronos	Minimizar la compensación de potencia reactiva en derivación
Límites de potencia activa y reactiva	SVC, condensadores y bancos de reactores	
Exportación de potencia activa neta	Transferencia de carga	Minimizar el desprendimiento de carga
Magnitudes de tensión y límites de ángulo	Flujo de MW en líneas HVDC Desconexión de carga	Minimizar la contaminación del aire
Reserva rodante	Conmutación de línea	
Restricciones de contingencia	Unidades de puesta en marcha en espera	
Limitaciones ambientales y de seguridad		

Fuente: adaptado de (Hajiabbas y Mohammadi-Ivatloo, 2020).

Tabla 2. Variables modelos OPTS

v	Inversión total
C_{ij}	Costo por línea adicionada entre $i-j$
n_{ij}	Número de líneas adicionadas entre $i-j$
Y_{ijk}	Variable de decisión binaria que representa una línea conectada entre el camino $i-j$, k determina cada una de las líneas que se pueden adicionar

Fuente: elaboración propia.

Modelos de optimización para OPTS

En ciencias aplicadas y en ingeniería, un modelo es una representación que permite relacionar variables, parámetros y restricciones a través de formulación matemática (Chow y Sánchez-Gasca, 2020, Kaveh y Bakhshpoori, 2019, Soroudi, 2017). En el OPTS, los modelos permiten analizar costos, establecer ubicaciones y dimensionar equipos de acuerdo con la proyección de la generación y la demanda. En la actualidad se utilizan varios modelos para representar OPTS, entre ellos: modelo de transporte, modelo híbrido lineal, modelo DC, modelo lineal disyuntivo (Fathi *et al.*, 2019, Peñaherrera Wilches, 2015, Tapias-Isaza *et al.*, 2011). En las tablas 2 y 3 se presenta la descripción de las variables y parámetros que se van a utilizar para la descripción de los modelos de OPTS.

Modelo de transporte

En (Garver, 1970), se formuló una metodología de modelado matemático utilizando programación lineal para resolver el problema de OPTS, aplicando el modelo de transporte. Este consiste en un modelo relajado que aplica la primera ley de Kirchhoff. La formulación matemática dada para este modelo se presenta en las ecuaciones (2) a (7).

Función objetivo:

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} n_{ij} \quad (2)$$

Restricciones:

$$Sf + g = d \quad (3)$$

$$|F_{ij}| \leq (n_{ij}^o + n_{ij}) f_{ijmax} \quad (4)$$

$$0 \leq g_i \leq g_{imax} \quad (5)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq n_{ijmax} \quad (6)$$

$$n \text{ entero}, f \text{ irrestricto} \quad (7)$$

La ecuación (2) representa la función objetivo que busca minimizar el costo de inversión en la adición de nuevas líneas para solucionar el problema de OPTS. La ecuación (2) corresponde a la primera ley de Kirchhoff, la cual describe que la suma de las corrientes que entran a un nodo debe ser igual a la suma de las corrientes que salen de este estableciendo el adecuado funcionamiento del sistema. La ecuación (4) establece la restricción del flujo de potencia se puede transmitir por las líneas. La ecuación (5) establece la restricción de generación máxima y mínima que se puede generar por

Tabla 3. Parámetros modelos OPTS

S	Matriz de incidencia de ramas del sistema eléctrico
f	Vector de flujo por las líneas
g	Vector de generación
d	Vector de la demanda
f_{ij}	Flujo de potencia entre i - j
n_{ij}^o	Número de líneas existentes entre i - j
f_{ijmax}	Flujo de potencia máximo por circuito entre i - j
g_i	Generación en el nodo i
g_{max}	Vector de máxima capacidad de generación en el nodo i
n_{ijmax}	Número máximo de líneas que se pueden adicionar entre i - j
θ_i	Ángulo en el nodo i
θ_j	Ángulo en el nodo j
γ_{ij}	Susceptancia equivalente de las líneas i - j
S'	Matriz de incidencia de posibles ramas nuevas del sistema eléctrico
S^0	Matriz de incidencia de ramas existentes del sistema eléctrico
f'	Vector de flujo por las posibles líneas nuevas
f^0	Vector de flujo por las líneas existentes
M	Parámetro de valor muy grande que permite la adición de la segunda ley de Kirchhoff vinculada a la variable binaria cuando toma el valor de 1.

Fuente: adaptado de ([Hajiabbas y Mohammadi-Ivatloo, 2020](#)).

nodo. La ecuación (6) determina la cantidad de líneas máximas y mínimas que se pueden adicionar entre nodos. La ecuación (7) indica que el número de líneas adicionada debe ser un número entero y el flujo de potencia puede tomar valores positivos, negativos o cero.

Al tener en cuenta solo la primera ley de Kirchhoff, este modelo no otorga un resultado del todo real u óptimo, lo que representa una gran desventaja; sin embargo, permite resolver sistemas conexos y no conexos. Este fue el primer modelo usado con éxito en el OPTS (Gonzalo y Torres, 2017).

Modelo DC

Este modelo, a diferencia del de transporte, debe satisfacer las dos leyes de Kirchhoff. De acuerdo con esto, es ampliamente utilizado para resolver el problema de OPTS (Saldarriaga-Zuluaga *et al.*, 2020). Debido a que para las líneas existentes y las posibles líneas nuevas adicionadas se consideran las dos leyes de Kirchhoff, el modelo es un problema no lineal entero mixto (Saldarriaga-Zuluaga *et al.*, 2016). La formulación matemática dada para este modelo se representa en las ecuaciones (8) a (16).

Función objetivo:

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij}n_{ij} + \alpha \sum_{i \in \Omega_1} r_i \quad (8)$$

Restricciones:

$$Sf + g + r = d \quad (9)$$

$$f_{ij} - (\theta_i - \theta_j)(n_{ij}^0 + n_{ij})\gamma_{ij} = 0 \quad (10)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij})f_{ijmax} \quad (11)$$

$$0 \leq g_i \leq g_{imax} \quad (12)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq n_{ijmax} \quad (13)$$

$$0 \leq r \leq d \quad (14)$$

$$\theta_k = 0(\text{slack}) \quad (15)$$

$$n_{ij} \text{ entero}, f_{ij}, r_i \text{ irrestricto} \quad (16)$$

La ecuación (8) establece la función objetivo, la cual minimiza el costo de la inversión y la generación artificial adicionada o cortes de carga. La ecuación (9) representa la conservación de potencia en cada nodo, es decir, la primera ley de Kirchhoff. La ecuación (10) representa la segunda ley de Kirchhoff e indica la diferencia angular entre nodos y el flujo de potencia activa entre ellos. La ecuación (11) representa el límite de capacidad del flujo de potencia activa en las líneas. Las ecuaciones (12), (13) y (14) establecen los límites de generación, cantidad de líneas y generación ficticia, respectivamente. La ecuación (15) presenta la función del nodo de *slack*, o referencia, evitando la presencia de matrices que no tengan solución o que tenga infinitas soluciones. Por último, la ecuación (16) indica que el número de líneas adicionada debe ser un número entero, el flujo de potencia y generación artificial adicionada o cortes de carga puede tomar valores positivos, negativos o cero (0).

Modelo híbrido lineal

Indica un modelo intermedio entre el modelo DC y de transporte, ya que al aplicar la primera ley de Kirchhoff solo a las posibles nuevas líneas, se puede considerar como el modelo de transporte, mientras que al aplicar la primera y la segunda ley de Kirchhoff a las líneas existentes se asemeja al DC (Escobar Vargas, 2013). En este sentido, se puede formular un modelo híbrido lineal o uno híbrido no lineal.

Por la complejidad del modelo híbrido no lineal se busca un enfoque más simplificado como el modelo híbrido lineal (Peñaherrera Wilches, 2015). Este es un problema de programación lineal entera mixta, con formulación matemática representada en las ecuaciones (17) a (25).

Función objetivo:

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} n_{ij} \quad (17)$$

Restricciones:

$$S' f' + S^0 f^0 + g = d \quad (18)$$

$$F_{ij}^0 - (\theta_i - \theta_j) n_{ij}^0 \gamma_{ij} = 0 \quad (19)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 f_{ijmax} \quad (20)$$

$$|f'_{ij}| \leq n_{ij} f_{ijmax} \quad (21)$$

$$0 \leq g_i \leq g_{imax} \quad (22)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq n_{ijmax} \quad (23)$$

$$\theta_k = 0 \text{ slack} \quad (24)$$

$$n_{ij} \text{ entero, } f_{ij} \text{ irrestricto} \quad (25)$$

Al igual que en los anteriores modelos, la ecuación (17) determina la función objetivo, la cual minimiza el costo de la inversión en la adición de nuevas líneas para solucionar el problema de OPTS. La ecuación (18) indica la primera ley de Kirchhoff, pero, a diferencia de los otros modelos, los flujos se separan de acuerdo con líneas existentes y posibles nuevas líneas. La ecuación (19) establece la segunda ley de Kirchhoff, teniendo en cuenta únicamente al flujo en las líneas existentes. Las ecuaciones (20) y (21) representan el límite de capacidad del flujo de potencia activa en líneas existentes y líneas candidatas respectivamente. Por otra parte, las ecuaciones (22) y (23) corresponden a los límites superior e inferior de generación y de la cantidad de líneas entre nodos. La ecuación (24) establece el nodo referencia, o *slack*, en el sistema. La ecuación (25) indica que el número de líneas adicionada debe ser un número entero y el flujo de potencia puede tomar valores positivos, negativos o cero (0).

Modelo lineal disyuntivo

Es un modelo lineal que se deriva del modelo DC, debido a que a ciertas restricciones la solución óptima puede ser la misma (Moreno Tobar, 2019). Este modelo presenta la adición de variables binarias asociadas a las líneas que toman el valor de "1" si es necesario agregar una nueva y el valor de "0", si no se necesita agregarla en el sistema existente, desagregando los términos cuadráticos a términos lineales (Félix Ruiz, 2018). La formulación matemática dada para este modelo se representa en las ecuaciones (26) a (34).

Función objetivo:

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} Y_{ijk} \quad (26)$$

Restricciones:

$$S' f' + S^0 f^0 + g + r = d \quad (27)$$

$$F_{ij}^0 - (\theta_i - \theta_j) n_{ij}^0 \gamma_{ij} = 0 \quad (28)$$

$$|f'_{ij} - \gamma_{ig}(\theta_i - \theta_j)| \leq M(1 - Y_{ij}) \quad (29)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 f_{ijmax} \quad (30)$$

$$|f'_{ij}| \leq Y_{ij} F_{ijmax} \quad (31)$$

$$0 \leq g_i \leq g_{imax} \quad (32)$$

$$0 \leq r \leq d \quad (33)$$

$$Y_{ijk} \text{ binario, } f_{ij} \text{ irrestricto} \quad (34)$$

La ecuación (26) representa la función objetivo la cual determina que se debe minimizar el costo de la inversión; cabe destacar que cuenta con la variable binaria a diferencia de los demás modelos. La ecuación (27) expresa la primera ley de Kirchhoff y, como se explicaba anteriormente en el modelo híbrido lineal, se separan los flujos de potencia de las líneas existentes de las líneas candidatas. La ecuación (28) determina la segunda ley de Kirchhoff aplicada solamente a las líneas existentes, mientras que la ecuación (29) representa la segunda ley de Kirchhoff para cada línea candidata; esto indica que el número de restricciones modeladas a través de la ecuación (29) depende del número máximo de líneas que se puedan adicionar (cada posible línea a adicionar tiene que ser considerado de forma independiente como una variable binaria). Las ecuaciones (30) y (31) indican la capacidad del flujo de potencia activa que tienen las líneas existentes y las líneas candidatas. Por último, las ecuaciones (32) y (33) establecen los límites de generación que posee el sistema y los límites de la generación ficticia. La ecuación (34) indica que la variable de decisión es un valor binario es decir 0 o 1 y el flujo de potencia puede tomar valores positivos, negativos o 0.

Este artículo se divide en cinco secciones, incluyendo la introducción. En "Herramientas para el modelo de OPTS", se presenta la descripción del *software* utilizado y un ejemplo del OPTS a través de esta herramienta. En "Metodología", se desarrolla la explicación de la metodología de solución, y se presentan los casos de estudios. En "Resultados", se analizan los resultados obtenidos. Finalmente, en "Conclusiones", se presentan las conclusiones y el trabajo futuro.

Herramientas para el modelo de OPTS

Las herramientas para el modelo y simulación del OPTS son útiles debido a que permiten explorar preguntas de investigación y prototipos a un costo y tiempo menor. Los simuladores proporcionan un entorno virtual con una variedad de características deseables, que facilitan modelar criterios específicos y analizar su rendimiento en diferentes escenarios (Chaudhary *et al.*, 2012). En el área

de optimización, *GAMS* es un *software* diseñado para modelar y resolver problemas lineales, no lineales y optimización entera mixta. A continuación, se presenta una descripción del *software* *GAMS*, adicionalmente, se ilustra un ejemplo del OPTS a través de esta herramienta.

Software GAMS

GAMS es un sistema de modelización que ayuda a resolver problemas de optimización matemática, tanto de programación lineal, como no lineal y entera; consta de un compilador con su propio lenguaje que permite implementar modelos matemáticos complejos, donde se podrán aplicar un rango de *solvers* o solucionadores (Babu y Singh, 2016).

Para resolver problemas con *GAMS*, según el modelo, los usuarios deben seleccionar el *solver*; así, *GAMS* verifica si los términos son adecuados al modelo, por ejemplo, el tipo de modelo de programación lineal (LP, por su sigla en inglés) no maneja términos no lineales y discretos (binarios, enteros, etc.) (Harish Kumar y Mageshvaran, 2020). En la tabla 4 se presentan algunos de los modelos con los respectivos *solvers* que se pueden utilizar en *GAMS*.

Para el ejemplo del OPTS, se utilizará el modelo MINLP, el cual se ocupa de modelar problemas no lineales con variables continuas, discretas o binarias, convirtiéndose en una gran herramienta

Tabla 4. Tipos de modelos con los respectivos *solvers* disponibles en *GAMS*

Tipo de modelo	Sigla	Solvers	Términos y variables
Programación lineal	LP	BARON, CPLEX, GUSS, KESTREL, KNITRO, entre otros	Sin términos no lineales, ni variables discretas
Programación no lineal	NLP	BARON, COUENNE, GUSS, KESTREL, entre otros	Términos generales no lineales sin variables binarias
Programación mixta	MIP	BARON, CPLEX, SCIP, entre otros	Variables binarias, enteras, sin términos no lineales
Programación no lineal entera mixta	MINLP	BONMIN, COUENNE, DICOPT, entre otros	Términos no lineales y variables discretas.
Programación no lineal con derivadas discontinuas	DNLP	ANTÍGONA, BARÓN, CONOPT, GUSS, IPOPT, KNITRO, entre otros	Términos no lineales, sin variables discretas

Fuente: elaboración propia.

para la solución de problemas, aunque es un modelo más complejo que los MIP o NLP (Furqan y Mawengkang, 2018). La formulación básica de este modelo se expresa en las ecuaciones (34) a (37), donde las funciones f son convexas y las variables x son continuas y/o discretas.

Función objetivo:

$$\min Z = f(x) \quad (35)$$

Restricciones:

$$c(x) \leq 0 \quad (36)$$

$$x^L \leq c(x) \leq x^U \quad (37)$$

$$Ay \leq a \quad (38)$$

En (Kronqvist et al., 2019), los *solvers* de GAMS que pueden solucionar el modelo MINLP son:

- ALPHAECPC: es un *solver* basado en una extensión del método plano de corte de Kelley capaz de solucionar un problema pseudoconvexo.
- BARÓN: es un *solver* que utiliza algoritmos de *branch and bound* para reducir el rango de variables y dar una solución óptima determinista.
- BONMIN: es un *solver* que cuenta con el algoritmo básico de *branch and bound* (B-BB), el algoritmo de descomposición de aproximación externa (B-OA), el algoritmo de aproximación externa basado en *branch and bound* (B-QG), y el algoritmo híbrido entre B-BB y B-QG (B-hyb).
- COUENNE: es un *solver* que maneja el algoritmo de *branch and bound* espacial basado en LP, admitiendo variables continuas, binarias y enteras, pero no conjuntos especializados.
- DICOPT: es un *solver* basado en una extensión del algoritmo de aproximación externa para la estrategia de relajación de la igualdad.
- KNITRO: es un *solver* que resuelve problemas con funciones suaves a gran escala mediante un algoritmo que itera hasta ser resuelto el problema también conocido como gradiente reducido generalizado.
- LINDOGLOBAL: es un *solver* que emplea algoritmos de *branch and bound* para dividir el problema en una lista de subproblemas en donde se produce una serie de restricciones se llega a la solución con un mínimo grado de tolerancia.

- OQNLP: es un *solver* que utiliza algoritmos heurísticos de arranque múltiple, lo que proporciona diferentes valores iniciales y devuelve las posibles soluciones determinando la más óptima de todas.
- SBB: es un *solver* que admite todo tipo de variables discretas que permite la combinación de modelos como *branch and bound* y otros de tipo NLP, donde se acortaran los límites de las variables creando submodelos hasta llegar a una solución óptima.

Ejemplo del OPTS a través del lenguaje GAMS

La figura 1 presenta un sistema de potencia de cuatro nodos (Escobar *et al.*, 2010), el cual cuenta con dos generadores y cinco líneas de transmisión; se tiene la posibilidad de adicionar una línea más por cada una de estas líneas, con el objetivo de cubrir la demanda del sistema al menor costo posible. Los datos del problema y la topología del sistema se pueden observar en la figura 1. Este caso se plantea como el ejemplo para explicar de manera práctica el modelo de transporte para OPTS.

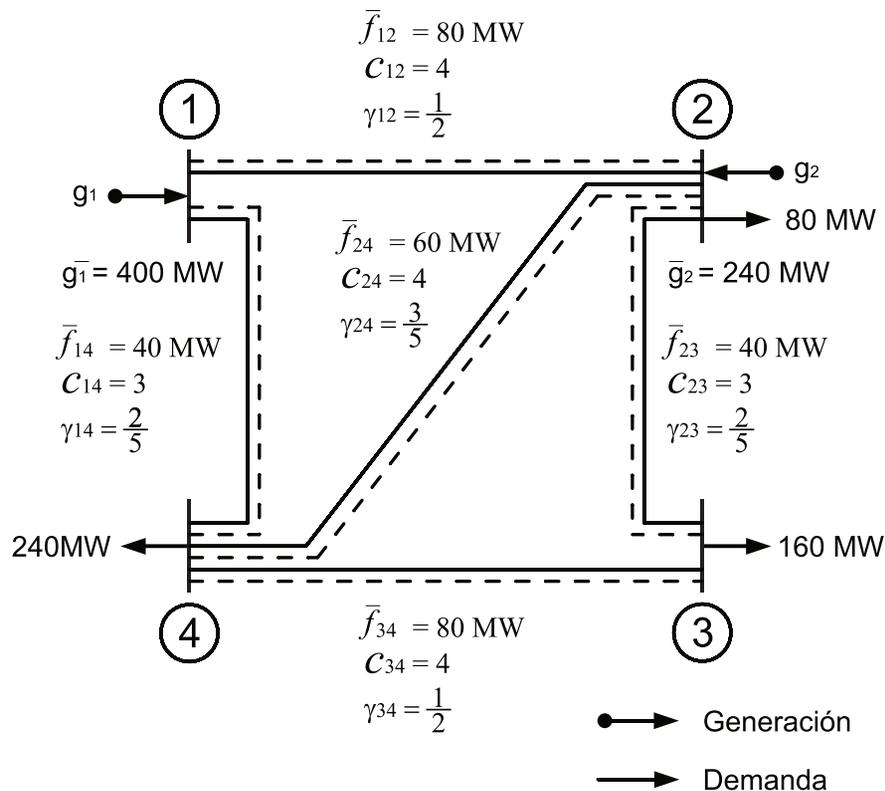


Figura 1. Sistema de potencia de cuatro nodos

Fuente: (Escobar *et al.*, 2010).

Formulación del problema

El primer paso es formular las ecuaciones sujetas a la primera ley de Kirchhoff, las cuales se aplican para cada nodo. Se consideran los flujos entrantes a los nodos como positivos y los que salen como negativos. La elección de los sentidos de los flujos se puede hacer de manera aleatoria, debido a que la solución arroja el sentido correcto de los flujos. De acuerdo con esto, las ecuaciones (39) a (42) representan la formulación de este primer paso.

$$g_1 - f_{12} - f_{14} = 0 \quad (39)$$

$$g_2 + f_{12} - f_{23} - f_{24} = 80 \quad (40)$$

$$f_{23} - f_{34} = 160 \quad (41)$$

$$f_{14} + f_{24} + f_{34} = 240 \quad (42)$$

Luego se procede a formular las ecuaciones (43) a (47), que representan el límite de capacidad de transmisión de cada línea.

$$|f_{12}| \leq 80 \cdot (1 + n_{12}) \quad (43)$$

$$|f_{14}| \leq 40 \cdot (1 + n_{14}) \quad (44)$$

$$|f_{23}| \leq 40 \cdot (1 + n_{23}) \quad (45)$$

$$|f_{24}| \leq 60 \cdot (1 + n_{24}) \quad (46)$$

$$|f_{34}| \leq 80 \cdot (1 + n_{34}) \quad (47)$$

Por otra parte, se plantean las restricciones sobre la capacidad de generación y el número máximo de adiciones permitidas de líneas, como se observa en las ecuaciones (48) a (54).

$$0 \leq g_1 \leq 400 \quad (48)$$

$$0 \leq g_2 \leq 240 \quad (49)$$

$$0 \leq n_{12} \leq 2 \quad (50)$$

$$0 \leq n_{14} \leq 2 \quad (51)$$

$$0 \leq n_{23} \leq 2 \quad (52)$$

$$0 \leq n_{24} \leq 2 \quad (53)$$

$$0 \leq n_{34} \leq 2 \quad (54)$$

Finalmente se establece la función objetivo, como se muestra en la ecuación (55).

$$\min v = 4n_{12} + 3n_{14} + 3n_{23} + 4n_{24} + 4n_{34} \quad (55)$$

Implementación en GAMS

El segundo paso es implementar la formulación del problema en el *software* GAMS. Esta se realiza en seis pasos, los cuales se caracterizan por seis algoritmos; la tabla 5 presenta los pasos, los algoritmos y la respectiva descripción.

Tabla 5. Tipos de modelos con los respectivos *solvers* disponibles en GAMS

Paso	Algoritmo	Descripción
1	Algoritmo 1	Definición de conjuntos del modelo matemático
2	Algoritmo 2	Definición de la matriz de incidencia, datos de las líneas y parámetros
3	Algoritmo 3	Variables del modelo
4	Algoritmo 4	Límites máximos y mínimos, de la capacidad de las líneas a construir y de la generación.
5	Algoritmo 5	Ecuaciones en formato GAMS
6	Algoritmo 6	Comandos para obtener la respuesta óptima del problema con el tipo de modelo específico.

Fuente: elaboración propia.

- *Definición de conjuntos del modelo matemático.* El algoritmo 1 inicia con la implementación del modelo matemático propuesto, con la definición de conjuntos; para ello se utiliza el comando "SETS". En GAMS se debe definir los conjuntos que son los que recorren los vectores del problema y los rangos de elementos en que varían dichos conjuntos. En este caso se define el conjunto "g" que indica los generadores presentes en el sistema; para el ejemplo, existen dos generadores por lo que G1 y G2 son los elementos que componen este conjunto. El conjunto "i" tiene como elementos los nodos del sistema N1, N2, N3 y N4, también se define el conjunto "L" el cual es constituido por las líneas L1 (corredor 1-2), L2 (corredor 1-4), L3 (corredor 2-4), L4 (corredor 2-3) y L5 (corredor 3-4); por último "MAP(g,i)" es un conjunto que asocia los generadores con los nodos.

Algoritmo 1. Definición de conjuntos del modelo matemático para el ejemplo propuesto e implementado en GAMS

	*Definición de conjuntos
1	SETS
2	g generadores /G1*G2/
3	i nodos del sistema /N1*N4/
4	L Conjunto de líneas /L1*L5/
5	MAP(g, i) mapa que asocia a g e i /G1.N1, G2.N2/;

- *Definición de la matriz de incidencia, datos de las líneas y parámetros.* En el algoritmo 2, se declara el comando "TABLE" que define una matriz de datos, donde "S" es la matriz de incidencia de los flujos del sistema y la tabla "Líneas" representa la matriz de datos de las líneas como costo, susceptancia, líneas existentes, el máximo número de líneas que se pueden adicionar en cada línea y el flujo de potencia activa máxima que puede pasar por cada línea.

Igualmente, en el algoritmo 2 se declara el comando "PARAMETER" para asignar valores a los elementos que componen cierto conjunto, en el ejemplo se implementa el "parameter D(i)" para asignar la demanda que tiene cada uno de los nodos, de la misma forma se designa el "parameter Gmax" para fijar el valor máximo que puede generar "G1" y "G2".

Algoritmo 2. Definición de la matriz de incidencia, datos de las líneas y parámetros

1	TABLE S (i,L)				
2		L1	L2	L3	L4 L5
3	N1	-1	-1	0	0 0
4	N2	1	0	-1	-1 0
5	N3	0	0	0	1 -1
6	N4	0	1	1	0 1;
7	TABLE Líneas(L,*)				
8		Cij	nijo	nijmax	fijmax
9	L1	4	1	2	80
10	L2	2	1	2	40
11	L3	4	1	2	60
12	L4	3	1	2	40
13	L5	4	1	2	80;
14	Parameter D(i)				
15	/N1 0, N2 80, N3 160, N4 240/;				
16	Parameter Gmax(g)				
17	/G1 400, G2 240/;				

- *Variables del modelo.* En el algoritmo 3, el comando “VARIABLES” define las variables del problema las cuales se les asigna un valor, una vez GAMS complete la ejecución del código; por ejemplo “v” es el costo a minimizar, “pg(g)” es la generación de las fuentes existentes en el sistema, por lo que depende del conjunto “g”, y “f(L)” es el flujo que pasa por las líneas; por tal motivo depende del conjunto (L). De manera análoga se utiliza “INTEGER VARIABLE”, para determinar que las variables definidas dentro de este comando son variables enteras, así como “nij(L)”.

Algoritmo 3. Variables del ejemplo propuesto

1	*Variables
2	VARIABLES
3	v costos totales
4	pg(g) generación en las fuentes
5	f(L) Flujos por las líneas;
6	INTEGER VARIABLE
7	nij(L) Cantidad de líneas adicionadas;

- *Límites máximos y mínimos, de la capacidad de las líneas a construir y de la generación.* En el algoritmo 4, se delimitan las variables de generación y el número de líneas que se pueden adicionar. El “. up” significa el límite superior y “. lo” el límite inferior.

Algoritmo 4. Límites máximos y mínimos, de la capacidad de las líneas a construir y de la generación

```

1 *Límites
2 nij.up(L) = Lineas(L,'nijmax'); nij.lo(L) = 0;
3 pg.lo(g) = 0; pg.up (g) = Gmax(g);
    
```

- *Ecuaciones en formato GAMS.* En el algoritmo 5 se formulan las ecuaciones del modelo matemático a resolver. Una vez definidos las variables y sus límites se proceden a utilizar el comando "EQUATIONS", el cual denota la función objetivo además de las restricciones del modelo matemático propuesto. En primer lugar, se escribe el nombre de la ecuación junto con una breve descripción de esta; si la ecuación depende de un conjunto, es necesario colocar el índice del conjunto entre paréntesis. Con base en lo anterior, se escriben las ecuaciones en formato GAMS, por ejemplo la función objetivo llamada "ObjFun" se formula con su nombre seguido de "..", después se escribe la ecuación con sus variables donde se puede utilizar operaciones matemáticas. Los símbolos que se utilizan para denotar si es una igualdad o una inecuación se escriben: "=L=" (menor o igual), "=G=" (mayor o igual) y la igualdad "=E=".

Algoritmo 5. Ecuaciones del ejemplo propuesto en formato GAMS

```

1 EQUATIONS
2 ObjFun Funcion objetivo
3 LCK(i) balance de potencias (primera LCK)
4 fmin(L) flujo minimo
5 fmax(L) flujo maximo;
6 ObjFun..v=E=sum(L,Lineas(L,'Cij')*nij(L));
7 LCK(i)..sum(L,S(i,L)*f(L))+sum(g$MAP(g,i),pg(g))=E=D(i);
8 fmax(L)..f(L) =L= (Lineas(L,'nijo')+ nij(L))*Lineas(L,'fijmax');
9 fmin(L)..f(L) =G= -(Lineas(L,'nijo')+nij(L))*Lineas(L,'fijmax');
    
```

- *Comandos para obtener la respuesta óptima del problema con el tipo de modelo específico.* En el algoritmo 6 se establece el solver a implementar y las variables que se van a optimizar para la solución del problema. Se coloca el comando "MODEL" seguido el nombre del archivo y "/ ALL/", esto indica que para la solución se deben tener en cuenta todas las restricciones definidas. Posteriormente se utiliza el comando "SOLVE" para establecer cuál tipo de modelo y qué variable se va a optimizar.

Algoritmo 6. Comandos para obtener la respuesta óptima del problema con un tipo de modelo específico

```

1 MODEL Transporte4nodos /ALL/
2 SOLVE Transporte4nodos us MINLP min v;
    
```

Finalmente, se compila el modelo descrito; si no se tiene ningún error de sintaxis en el código se despliega una nueva ventana en la que el *software* mostrará el desarrollo y solución del problema.

Resultados del OPTS en GAMS

En la tabla 6, se observan los resultados obtenidos por GAMS con el solver "DICOPT"; el costo óptimo para el problema ejemplo es de 24 PU, también se evidencia el flujo que pasa por las líneas y el total de líneas en cada uno de los corredores.

Tabla 6. Resultados obtenidos con el *software* GAMS del problema ejemplo

Resultado obtenido	Nodo i	Nodo j	Líneas totales	Costo (PU)	Flujos (MW)
L1	1	2	1	4	120
L2	1	4	2	3	120
L3	2	4	2	4	180
L4	2	3	2	3	100
L5	3	4	0	4	-60
Total de costos (PU)			24 PU		

Fuente: elaboración propia.

La figura 2 presenta la solución del OPTS para el sistema de cuatro nodos utilizando GAMS con el solver "DICOPT" para el modelo MINLP.

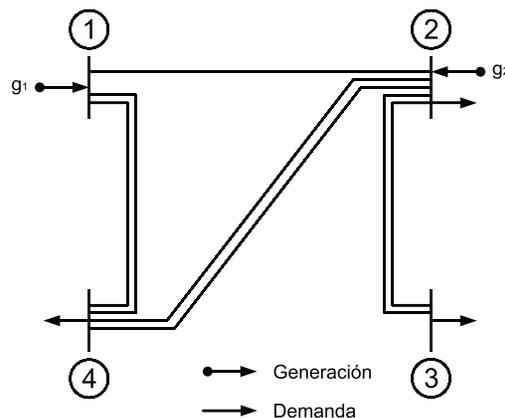


Figura 2. Solución OPTS para el sistema de cuatro nodos

Fuente: elaboración propia.

Metodología

En la figura 3 se presenta el diagrama de flujo para determinar los costos de expansión de sistemas de transmisión cuando se emplea un modelo matemático en el *software* GAMS. Está dividido en cinco etapas: la primera identifica el sistema de transmisión, la segunda establece el problema de planeamiento del sistema de transmisión, la tercera realiza la formulación del sistema de potencia de acuerdo con cada uno de los modelos de optimización, la cuarta aplica la formulación del sistema de potencia en el *software* GAMS y la última selecciona el costo óptimo.

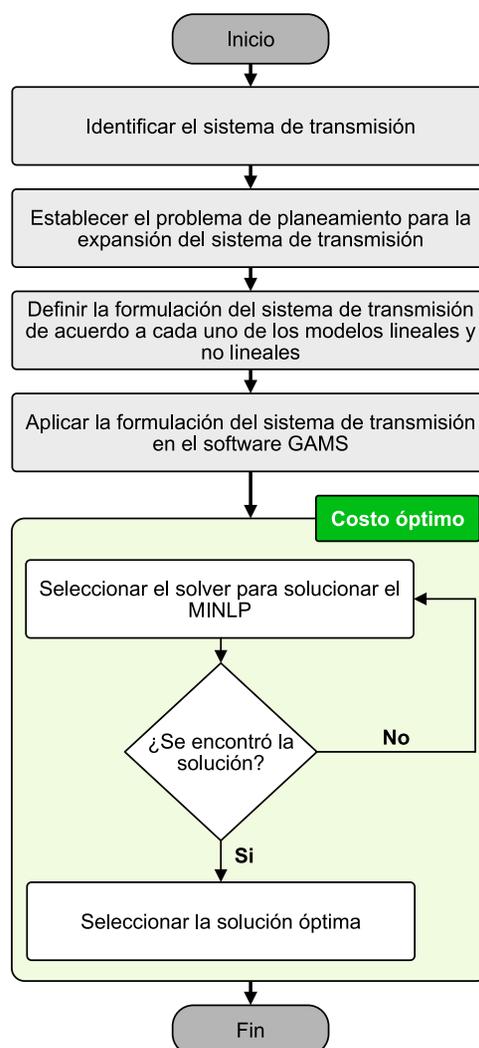


Figura 3. Metodología para determinar los costos de expansión de sistemas de transmisión

Fuente: elaboración propia.

Sistema de potencia Sur Brasileiro 46 nodos

Cuenta con 46 líneas, 12 generadores y 19 cargas (figura 5). Es un sistema de tamaño y complejidad media. La información sobre los parámetros de sistema se puede consultar en (Haffner, 2000).

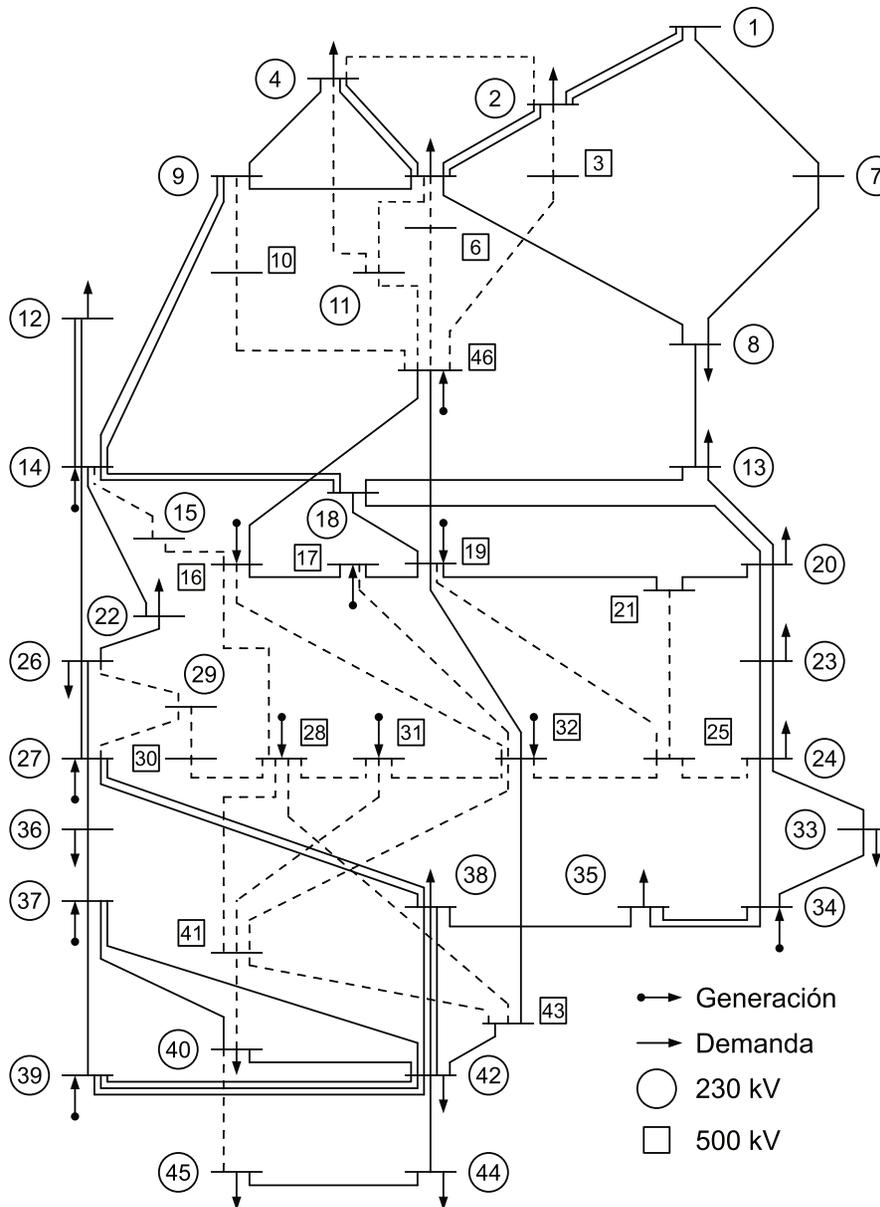


Figura 5. Topología del sistema Sur Brasileño 46 nodos

Fuente: (Haffner, 2000).

Establecer el problema de planeamiento de la expansión del sistema de transmisión

Una vez se tiene el caso de estudio y el respectivo análisis de flujo de carga, es necesario resolver la pregunta: Qué elementos se requieren para satisfacer el crecimiento de la demanda y la inclusión de nuevas fuentes de generación a un mínimo costo de inversión?; es decir, cuál es el problema de planeamiento del sistema de transmisión a resolver. A partir del problema de planeamiento, se definen las variables asociadas de proyección: costo de construcción de nuevas líneas, flujo de potencia máximo que soporta cada línea, entre otras variables que permitan aplicar la formulación para resolver el problema a través de modelos de optimización. A continuación, se describen los problemas de planeamiento que se analizarán en los casos de estudio seleccionados.

Sistema de potencia Garver 6 nodos

Se pretende expandir el sistema con 15 líneas candidatas. Para este, existen dos casos de estudio: uno donde la capacidad de generación es igual a la demanda total (sin redespacho) y el otro donde la capacidad de generación es superior a la demanda total (con redespacho).

Sistema de potencia Sur Brasileiro 46 nodos

Se pretende expandir el sistema con 79 líneas candidatas. Para este, existen dos casos de estudio sin redespacho y con redespacho.

Para la formulación del sistema Garver, se definió como función objetivo la ecuación (56), la cual representa la suma de los costos por el número de líneas adicionadas, por ejemplo, $CL1 \cdot L1 = 40 \cdot n_{12}$, así respectivamente con cada una de las líneas candidatas. En el modelo de transporte se toman en cuenta 36 restricciones (6 para la primera ley de Kirchhoff y 30 para el límite de capacidad de transmisión de cada línea). En el modelo DC se considera que el sistema no tiene generación artificial adicionada o cortes de carga, por eso la función objetivo será la misma ecuación (56), sujeta a 51 restricciones (6 para la primera ley de Kirchhoff, 15 para la segunda ley de Kirchhoff y 30 para el límite de capacidad de transmisión de cada línea). En el modelo híbrido lineal se maneja la misma función objetivo del modelo de transporte, sujeta a 81 restricciones (6 para primera ley de Kirchhoff, 15 para la segunda ley de Kirchhoff teniendo en cuenta únicamente al flujo en las líneas existentes, 30 de la capacidad del flujo de potencia activa en líneas existentes y 30 de la capacidad del flujo de potencia activa en líneas candidatas).

$$\min v \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} n_{ij} ; n_{ij} = L1, \dots, L15; C_{ij} = CL1, \dots, CL15 \quad (56)$$

A diferencia de los anteriores modelos, el modelo lineal disyuntivo por su variable binaria la función objetivo está dada por la ecuación (57), sujeta 291 restricciones (6 para la primera ley de Kirchhoff, 15 para la segunda ley de Kirchhoff de las líneas existentes, 120 para la segunda ley de

Kirchhoff de cada línea candidata, 30 de la capacidad del flujo de potencia activa en líneas existentes y 120 de la capacidad del flujo de potencia activa en líneas candidatas)

$$\min v \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} Y_{ijk} ; n_{ij} = L1, \dots, L15; C_{ij} = CL1, \dots, CL15 ; k = 1, 2, 3, 4 \quad (57)$$

Para la formulación del sistema de potencia Sur Brasilerio se utilizó la función objetivo de la ecuación (58) para los modelos de transporte, DC e híbrido lineal. En el modelo de transporte se toman en cuenta 204 restricciones (46 para la primera ley de Kirchhoff y 158 para el límite de capacidad de transmisión de cada línea). En el modelo DC se tienen 283 restricciones (46 para la primera ley de Kirchhoff, 79 para la segunda ley de Kirchhoff y 158 para el límite de capacidad de transmisión de cada línea). El modelo híbrido lineal con 441 restricciones (46 para primera ley de Kirchhoff, 79 para la segunda ley de Kirchhoff teniendo en cuenta únicamente al flujo en las líneas existentes, 158 de la capacidad del flujo de potencia activa en líneas existentes y 158 de la capacidad del flujo de potencia activa en líneas candidatas).

$$\min v \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} n_{ik} ; n_{ij} = L1, \dots, L79; C_{ij} = CL1, \dots, CL79 \quad (58)$$

El modelo lineal disyuntivo tiene como función objetivo la ecuación (59), sujeta a 1547 restricciones (46 para la primera ley de Kirchhoff, 79 para la segunda ley de Kirchhoff de las líneas existentes, 632 para la segunda ley de Kirchhoff de cada línea candidata, 158 de la capacidad del flujo de potencia activa en líneas existentes y 632 de la capacidad del flujo de potencia activa en líneas candidatas).

$$\min v \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} Y_{ijk} ; n_{ij} = L1, \dots, L79; C_{ij} = CL1, \dots, CL79 ; k = 1, 2, 3, 4 \quad (59)$$

Al tener los datos del sistema de transmisión, es esencial definir su formulación para así encontrar una configuración que produzca la menor inversión en el plan de expansión del sistema de transmisión (función objetivo), que cumpla con las condiciones adecuadas de operación de este sistema; para ello se caracterizan matrices y restricciones de cada sistema para los modelos de optimización lineales y no lineales. Esta formulación se describe en detalle en la introducción.

Aplicar la formulación del sistema de transmisión en el *software* GAMS

Una vez establecida la formulación de los modelos para cada uno de los sistemas de transmisión, se implementan en el lenguaje de programación del *software* GAMS anteriormente explicado, y se determinan los conjuntos, variables y parámetros del sistema de transmisión.

Seleccionar costo óptimo

La selección de los *solver* se realiza a través de un conjunto de pruebas, donde se incluye el análisis de la carga computacional y el costo óptimo. La prueba se realiza comparando uno a uno los *solvers* que se describen en la tabla 4 para el problema MINLP. Las tablas 7, 8 y 9 presentan la descripción de los modelos y *solver* a implementar de acuerdo con el sistema de potencia y con las pruebas realizadas entre *solver*.

Tabla 7. Sistema Garver 6 nodos sin redespacho en GAMS

Modelo	Transporte	Híbrido lineal	DC	Lineal disyuntivo
<i>Solver GAMS</i>	SBB	SBB	LINDOGLOBAL	SHOT

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Sistema Garver 6 nodos con redespacho en GAMS

Modelo	Transporte	Híbrido lineal	DC	Lineal disyuntivo
<i>Solver GAMS</i>	DICOPT	DICOPT	LINDOGLOBAL	LINDOGLOBAL

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Sistema Sur Brasileiro nodos sin redespacho y con redespacho

Modelo	Transporte	Híbrido lineal	DC	Lineal disyuntivo
<i>Solver GAMS</i>	XPRESS	XPRESS	XPRESS	BONMIN

Fuente: elaboración propia.

GAMS ofrece un informe de resultados de manera clara y detallada, donde muestra la compilación de las ecuaciones, las variables y restricciones presentes en el modelo; esto conlleva a realizar la comparación de la formulación realizada y la obtenida al compilar GAMS, para verificar si el modelo se realizó de la manera correcta.

Resultados

Los resultados, de acuerdo con la información descrita en las tablas 7, 8 y 9, se presentan a través de las métricas de costo (c_{ij}), cantidad de líneas a incluir (n_{ij}), y el tiempo de simulación computacional. La implementación de los modelos se realizó en GAMS IDE 34, con excepción del modelo

lineal disyuntivo, debido al *solver* se utilizó la versión GAMS 25.1.3. Como equipo de procesamiento, se utilizó un computador con un procesador Intel(R) Core(TM) i5-5200U CPU, 6 GB de RAM y sistema operativo Microsoft Windows 10 64-bit. A continuación se presentan los resultados para los dos casos de estudio implementado.

Sistema de potencia Garver 6 nodos

En las tablas 10 y 11 se presentan los resultados obtenidos para el sistema sin redespacho y con redespacho.

En la tabla 10 se evidencia que en las soluciones hay dos líneas que aparecen independiente del modelo, las cuales son: n_{2-6} , n_{4-6} ; en la tabla 4 se observa el mismo patrón pero con la línea n_{3-5} . Esta característica indica que son líneas necesarias dentro de la solución del problema, por eso todos los modelos las identifican como líneas de interés, y que están conectadas directamente a los nodos de generación. En el modelo de transporte, debido a que tiene menos restricciones, se adiciona la línea n_{1-5} .

Los resultados del costo óptimo para el caso sin redespacho son de 200×10^3 USD sin importar el modelo, mientras que, para el caso con redespacho, tomando el modelo DC como referencia (130×10^3 USD), los otros modelos tienen una diferencia porcentual de 15,38 %, como se observa en la figura 6.

Tabla 10. Sistema Garver 6 nodos sin redespacho en GAMS

Modelo	Transporte	Híbrido lineal	DC	Lineal disyuntivo
<i>Solver</i>	SBB	SBB	LINDOGLOBAL	SHOT
Costo óptimo (10^3 USD)	200	200	200	200
Cantidad de líneas	$n_{1-5} = 1$ $n_{2-6} = 4$ $n_{4-6} = 2$	$n_{2-6} = 3$ $n_{3-5} = 1$ $n_{4-6} = 3$	$n_{2-6} = 4$ $n_{3-5} = 1$ $n_{4-6} = 2$	$n_{2-6} = 4$ $n_{3-5} = 1$ $n_{4-6} = 2$
Tiempo de simulación (s)	1,5	1,219	0,422	0,422

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11. Sistema Garver 6 nodos con redespacho en GAMS

Modelo	Transporte	Híbrido lineal	DC	Lineal disyuntivo
<i>Solver</i>	DICOPT	DICOPT	LINDOGLOBAL	LINDOGLOBAL
Costo óptimo (10^3 USD)	110	110	130	110
Cantidad de líneas	$n_{2-6} = 3$ $n_{3-5} = 1$	$n_{3-5} = 1$ $n_{4-6} = 3$	$n_{2-6} = 2$ $n_{3-5} = 2$ $n_{4-6} = 1$	$n_{3-5} = 1$ $n_{4-6} = 3$
Tiempo de simulación (s)	0,187	0,204	0,0297	0,407

Fuente: elaboración propia.

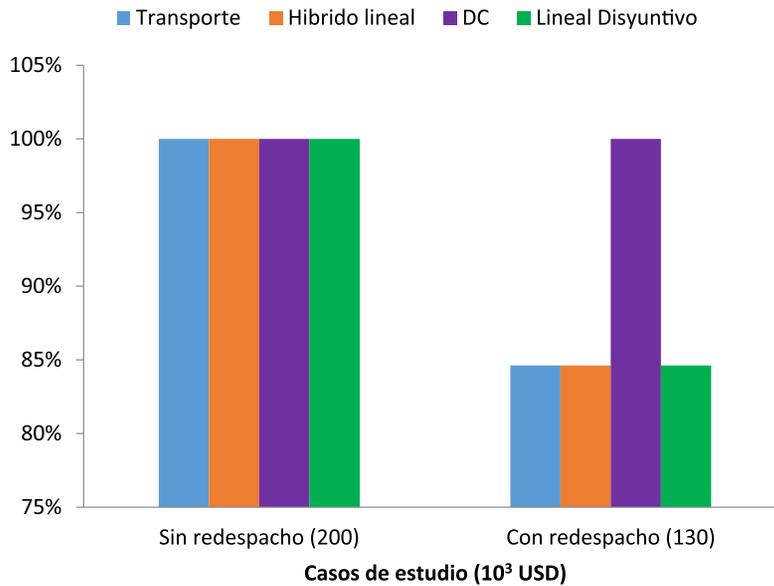


Figura 6. Sistema Garver 6 nodos diferencia porcentual de costos para cada modelo

Fuente: elaboración propia.

Análisis comparativo MATLAB

Con el objetivo de establecer si los modelos están bien desarrollados en GAMS, se realiza una implementación del caso de estudio en el MATLAB, para este análisis comparativo solo se aplica el modelo de transporte y el modelo híbrido lineal. Las tablas 12 y 13 presentan los resultados obtenidos.

Tabla 12. Sistema Garver 6 nodos sin redespacho en *MATLAB*

Modelo	Transporte	Híbrido lineal
Costo óptimo (103 USD)	200	200
Cantidad de líneas	$n_{2-6} = 4$	$n_{1-5} = 1$
	$n_{3-5} = 1$	$n_{2-6} = 4$
	$n_{4-6} = 2$	$n_{4-6} = 2$

Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Sistema Garver 6 nodos con redespacho en *MATLAB*

Modelo	Transporte	Híbrido lineal
Costo óptimo (10^3 USD)	110	130
Cantidad de líneas	$n_{2-6} = 3$	$n_{2-3} = 1$
	$n_{3-5} = 1$	$n_{3-5} = 1$
		$n_{4-6} = 3$

Fuente: elaboración propia.

Al comparar los resultados de las tablas 10 y 11 con los obtenidos en las tablas 12 y 13, además de los presentados en (Mónica *et al.*, 2012), se establece similitud en las métricas utilizadas; esto confirma que los modelos están bien desarrollados en GAMS y por tanto se puede continuar con la implementación del segundo caso de estudio. Es importante resaltar que para el sistema del Sur Brasileiro no se implementa este análisis comparativo, debido a que el objetivo del trabajo es implementar los modelos de optimización en GAMS.

Sistema de potencia Sur Brasileiro 46 nodos

En las tablas 14 y 15 se presentan los resultados obtenidos para el sistema sin redespacho y con redespacho.

Como se observa en la tabla 14, las líneas significativas para el caso sin redespacho son n_{20-21} , n_{42-43} , n_{31-32} , n_{24-25} . Para el caso con redespacho, como se observa en la tabla 15, las líneas significativas son n_{20-21} , $n_{42,43}$. Para los dos escenarios, las líneas significativas son las que están asociadas a los nodos con mayor demanda del sistema: n_{20} , n_{42} .

Tabla 14. Sistema Sur Brasileiro nodos sin redespacho en GAMS

Modelo	Transporte	Híbrido lineal	DC	Lineal disyuntivo
<i>Solver</i>	XPRESS	XPRESS	XPRESS	BONMIN
Costo óptimo (10 ³ USD)	127272	141350	154420	154420
Cantidad de líneas	$n_{14-22} = 1$ $n_{20-21} = 2$ $n_{42-43} = 2$ $n_{5-11} = 2$ $n_{25-32} = 1$ $n_{31-32} = 1$ $n_{28-31} = 1$ $n_{31-32} = 1$ $n_{28-31} = 1$ $n_{46-11} = 1$ $n_{24-25} = 2$	$n_{20-21} = 1$ $n_{42-43} = 2$ $n_{46-6} = 1$ $n_{25-32} = 1$ $n_{31-32} = 1$ $n_{28-31} = 1$ $n_{28-30} = 1$ $n_{26-29} = 2$ $n_{24-25} = 2$ $n_{29-30} = 1$ $n_{5-6} = 1$	$n_{20-21} = 1$ $n_{42-43} = 2$ $n_{46-6} = 1$ $n_{19-25} = 1$ $n_{31-32} = 1$ $n_{28-30} = 1$ $n_{26-29} = 3$ $n_{24-25} = 2$ $n_{29-30} = 2$ $n_{5-6} = 2$	$n_{20-21} = 1$ $n_{42-43} = 2$ $n_{46-6} = 1$ $n_{19-25} = 1$ $n_{31-32} = 1$ $n_{28-30} = 1$ $n_{26-29} = 3$ $n_{24-25} = 2$ $n_{29-30} = 2$ $n_{5-6} = 2$
Tiempo de simulación (s)	0,797	1,047	26,93	1000,85

Fuente: elaboración propia.

Tabla 15. Sistema Sur Brasileño nodos con redespacho en GAMS

Modelo	Transporte	Híbrido lineal	DC	Lineal disyuntivo
<i>Solver</i>	XPRESS	XPRESS	XPRESS	BONMIN
Costo óptimo (10 ³ USD)	53334	63163	72870	72870
Cantidad de líneas	$n_{33-34} = 1$ $n_{20-21} = 2$ $n_{42-43} = 1$ $n_{5-11} = 2$ $n_{46-11} = 1$	$n_{20-23} = 1$ $n_{20-21} = 2$ $n_{42-43} = 1$ $n_{46-6} = 1$ $n_{5-6} = 2$	$n_{2-5} = 1$ $n_{13-20} = 1$ $n_{20-23} = 1$ $n_{20-21} = 2$ $n_{42-43} = 1$ $n_{46-6} = 1$ $n_{5-6} = 2$	$n_{2-5} = 1$ $n_{13-20} = 1$ $n_{20-23} = 1$ $n_{20-21} = 2$ $n_{42-43} = 1$ $n_{46-6} = 1$ $n_{5-6} = 2$
Tiempo de simulación (s)	0,312	0,453	8,563	1000,82

Fuente: elaboración propia.

Los resultados del costo óptimo para el caso sin redespacho son idénticos en el modelo DC y modelo lineal disyuntivo, con una diferencia porcentual de 8,46 % con el modelo híbrido lineal y de 17,58 % con el de transporte. En el caso con redespacho también se presentó que el costo es el mismo en los modelos DC y lineal disyuntivo, teniendo una gran diferencia con el modelo de transporte de 26,81 %, como se observa en la figura 7.

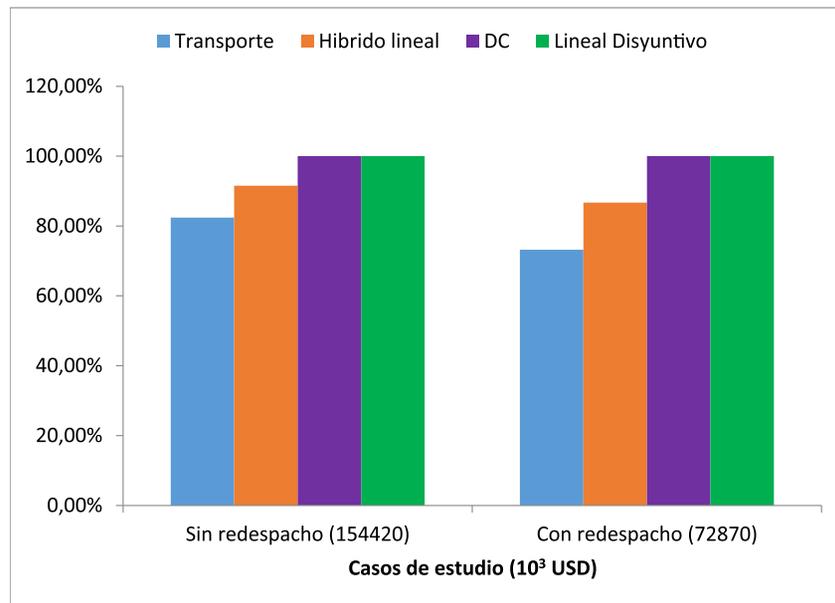


Figura 7. Sistema Sur Brasileiro 46 nodos diferencia porcentual de costos para cada modelo

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

GAMS es un *software* que permite analizar el OPTS a través de modelos MINLP, se caracteriza por su baja carga computacional y por contar con diferentes *solver*. Estos, utilizados para resolver OPTS, pueden no encontrar una solución óptima debido a que los algoritmos que manejan se ven afectados por el número del sistema y por la complejidad del planeamiento de expansión del sistema.

Los modelos implementados presentaron desempeños equivalentes en el sistema de Garver de 6 nodos, esto se debe a que el sistema es pequeño. Para el sistema Sur Brasileiro de 46 nodos, el desempeño de los modelos no presenta similitud, por el contrario, se identifican diferencias importantes en los resultados, lo que permite caracterizar *solver* específicos de acuerdo con el número de nodos. Desde el análisis de costo óptimo, el modelo DC y el modelo lineal disyuntivo presentaron para los dos sistemas de potencia el mayor costo respecto al modelo de transporte y al modelo híbrido lineal.

Trabajo futuro

Son diversos los análisis que se pueden realizar para el planeamiento de sistemas de potencia. Los modelos de optimización deben aprovechar los avances en *software* y *hardware*, las estrategias deben ser escalables para aliviar la carga computacional y poder resolver problemas de mayor complejidad. Los desafíos crecen exponencialmente al igual que las técnicas disponibles, el trabajo permanente es identificar, proponer y analizar la eficiencia de las técnicas de optimización (nuevas o híbridas).

En este trabajo se analizaron restricciones de flujo de potencia, límites de generación y número de líneas por circuito; sin embargo, como trabajo futuro, se deben incluir restricciones asociadas al valor de la capacidad de las fuentes de suministro, niveles de estabilidad, adquisición de reservas, comportamiento del almacenamiento y la integración de otros sectores energéticos.

Referencias

- [Abdin y Zio, 2019] Abdin, I. F. y Zio, E. (2019). Optimal planning of electric power systems. En M. Fathi (Ed.), *Optimization in large scale problems* (pp. 53-65). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28565-4_10 ↑Ver página 18
- [Álvarez *et al.*, 2020] Álvarez, E. F., Paredes, M. y Rider, M. J. (2020). Semidefinite relaxation and generalised benders decomposition to solve the transmission expansion network and reactive power planning. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(11), 2160-2168. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.0331> ↑Ver página 36
- [Babu y Singh, 2016] Babu, P. V. y Singh, S. P. (2016). Optimal placement of DG in distribution network for power loss minimization using NLP & PLS Technique. *Energy Procedia*, 90, 441-454. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.211> ↑Ver página 26
- [Correa Flórez *et al.*, 2020] Correa Flórez, C. A., Sánchez Salcedo, A. y Panesso Hernández, A. (2020). Metodología multiobjetivo para el planeamiento de la expansión de la transmisión considerando incertidumbres en la generación eólica y la demanda. *INGE CUC*, 16(1), 2382-4700. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.16.1.2020.20> ↑Ver página 36
- [Chaudhary *et al.*, 2012] Chaudhary, R., Sethi, S., Keshari, R. y Goel, S. (2012). A study of comparison of Network Simulator-3 and Network Simulator-2. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 3(1), 3085-3092. ↑Ver página 25
- [Chow y Sánchez-Gasca, 2020] Chow, J. H. y Sánchez-Gasca, J. J. (2020). *Power system modeling, computation, and control*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119546924> ↑Ver página 20

- [Das *et al.*, 2020] Das, S., Verma, A. y Bijwe, P. R. (2020). Efficient multi-year security constrained ac transmission network expansion planning. *Electric Power Systems Research*, 187, 106507. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106507> ↑Ver página 36
- [De Oliveira *et al.*, 2017] De Oliveira, L. E., Freitas, F. D., Junior, I. C. S. y Rosa, F. P. O. (2017). A three stage hybrid technique for dynamic transmission network expansion planning. En *The 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmisión - Clagtee* (pp. 1-8). Mar del Plata, Argentina. ↑Ver página 36
- [Escobar *et al.*, 2010] Escobar, A., Romero, R. y Gallego, R. (2010). *Modelos usados en el planeamiento de la expansión a largo plazo de sistemas de transmisión de energía eléctrica* Editorial Universidad Tecnológica de Pereira. ↑Ver página 28
- [Escobar Vargas, 2013] Escobar Vargas, L. M. (2013). *Impacto del direccionamiento de los escenarios de generación y demanda en la solución del problema de planeamiento de la expansión de redes de transmisión* (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira - Facultad de Ingeniería Eléctrica. Pereira, Colombia. ↑Ver página 23
- [Fathi *et al.*, 2019] Fathi, M., Khakifirooz, M. y Pardalos, P. M. (2019). *Optimization in large scale problems: Industry 4.0 and Society 5.0 Applications* (Vol. 152). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-28565-4> ↑Ver página 18, 20
- [Félix Ruiz, 2018] Félix Ruiz, R. S. (2018). *Modelo multietapa para el planeamiento óptimo de la expansión de redes de subtransmisión considerando reconfiguración y pérdidas técnicas: caso Lima Sur* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27146.52162> 24
↑Ver página
- [Furqan y Mawengkang, 2018] Furqan, M. y Mawengkang, H. (2018). Developing a framework of hybrid method for tackling large-scale mixed integer nonlinear programming problems. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(12), 720-728. ↑Ver página 27
- [Garver, 1970] Garver, L. (1970). Transmission network estimation using linear programming. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 7, 1688-1697. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1970.292825> ↑Ver página 20
- [Gayibov, 2020] Gayibov, T. (2020). Algorithm for optimization of power system short-term mode in conditions of partial uncertainty of initial information taking into account the frequency change. *E3S Web of Conferences*, 216, 1100. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601100>
↑Ver página 18

- [Gonzalo y Torres, 2017] Gonzalo, E. y Torres, S (2017). *Planeamiento de la expansión de sistemas de transmisión usando el modelo AC y algoritmos de estimación de distribución* (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. ↑Ver página 22
- [Haffner, 2000] Haffner, S. L. (2000). *O planejamento da expansão dos sistemas elétricos no contexto de um ambiente competitivo* (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Elétrica. São Paulo, Brasil ↑Ver página 36, 37
- [Hajiabbas y Mohammadi-Ivatloo, 2020] Hajiabbas, M. P. y Mohammadi-Ivatloo, B. (eds.). (2020). *Optimization of power system problems: methods, algorithms and MATLAB codes* (Vol. 262). Springer Nature. ↑Ver página 19, 21
- [Harish Kumar y Mageshvaran, 2020] Harish Kumar, P. y Mageshvaran, R. (2020). Methods and solvers used for solving mixed integer linear programming and mixed nonlinear programming problems: A review. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 9(1), 1872-1882. ↑Ver página 26
- [Helistö *et al.*, 2019] Helistö, N., Kiviluoma, J., Holttinen, H., Lara, J. D. y Hodge, B.-M. (2019). Including operational aspects in the planning of power systems with large amounts of variable generation: A review of modeling approaches. *WIREs Energy and Environment*, 8(5), e341. <https://doi.org/10.1002/wene.341> ↑Ver página 18
- [Kaveh y Bakhshpoori, 2019] Kaveh, A. y Bakhshpoori, T. (2019). *Metaheuristics: Outlines, MATLAB codes and examples*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04067-3> ↑Ver página 20
- [Kronqvist *et al.*, 2019] Kronqvist, J., Bernal, D. E., Lundell, A. y Grossmann, I. E. (2019). A review and comparison of solvers for convex MINLP. *Optimization and Engineering*, 20(2), 397-455. <https://doi.org/10.1007/s11081-018-9411-8> ↑Ver página 27
- [Ledezma y Alcaraz, 2020] Ledezma, L. F. F. y Alcaraz, G. G. (2020). Hybrid binary PSO for transmission expansion planning considering N-1 security criterion. *IEEE Latin America Transactions*, 18(03), 545-553. <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9082726> ↑Ver página 36
- [Lu *et al.*, 2007] Lu, W., Bompard, E., Napoli, R. y Jiang, X. (2007). Heuristic procedures for transmission planning in competitive electricity markets. *Electric Power Systems Research*, 77(10), 1337-1348. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.10.003> ↑Ver página 19
- [Melchor, 2013] Melchor, J. (2013). *Planeamiento de la expansión de redes de transmisión involucrando restricciones especializadas* (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira - Facultad de Ingeniería Eléctrica. Pereira, Colombia. ↑Ver página 36

- [Meneses *et al.*, 2020] Meneses, M., Nascimento, E., Macedo, L. H. y Romero, R. (2020). Transmission network expansion planning considering line switching. *IEEE Access*, 8, 115148-115158. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3003973> ↑Ver página 36
- [Mohammadi-ivatloo y Nazari-Heris, 2019] Mohammadi-ivatloo, B. y Nazari-Heris, M. (2019). *Robust optimal planning and operation of electrical energy systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04296-7> ↑Ver página 18
- [Mónica *et al.*, 2012] Mónica, L., Vargas, E., Gómez, A. D., Nicolás, J. y Hernando, A. (2012). Planeamiento de sistemas de transmisión de energía eléctrica usando AMPL, 51, 22-27. ↑Ver página 43
- [Moreno Tobar, 2019] Moreno Tobar, D. A. (2019). *Planeación integrada generación-transmisión (PIGT) en el área Caribe del sistema eléctrico colombiano* (Tesis de pregrado). Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. ↑Ver página 24
- [Morquecho *et al.*, 2021] Morquecho, E. G., Torres, S. P. y Castro, C. A. (2021). An efficient hybrid metaheuristics optimization technique applied to the AC electric transmission network expansion planning. *Swarm and Evolutionary Computation*, 61, 100830. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100830> ↑Ver página 19
- [Nguyen y Santoso, 2021] Nguyen, Q. y Santoso, S. (2021). Optimal planning and operation of multi-frequency HVac Transmission Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(1), 689-698. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3037967> ↑Ver página 18
- [Peñaherrera Wilches, 2015] Peñaherrera Wilches, A. (2015). *Planeamiento de la expansión de los sistemas eléctricos de transmisión utilizando el modelo AC resuelto mediante algoritmos evolutivos*. Universidad de Cuenca (Tesis de maestría). Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. ↑Ver página 20, 23
- [Ruan *et al.*, 2020] Ruan, G., Zhong, H., Zhang, G., He, Y., Wang, X. y Pu, T. (2020). Review of learning- assisted power system optimization. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 7(2), 221-231. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.12895337> ↑Ver página 19
- [Saldarriaga-Zuluaga *et al.*, 2016] Saldarriaga-Zuluaga, S. D., López-Lezama, J. M. y Galeano, N. M. (2016). Planeamiento de la expansión integrada generación-transmisión: una revisión del estado del arte. *Tecnológicas*, 19(37), 79. <https://doi.org/10.22430/22565337.83> ↑Ver página 22
- [Saldarriaga-Zuluaga *et al.*, 2019] Saldarriaga-Zuluaga, S. D., López-Lezama, J. M. y Villada, F. (2019). Transmission network expansion planning considering security constraints through nodal indexes. *Engineering Letters*, 27(2). ↑Ver página 19
- [Saldarriaga-Zuluaga *et al.*, 2020] Saldarriaga-Zuluaga, S. D., López Lezama, J. M. y Muñoz Galeano, N. (2020). Enseñando el planeamiento de la expansión de redes de transmisión usando el software GAMS. *Revista Espacios*, 41(31), 322-335. ↑Ver página 22

[Soroudi, 2017] Soroudi, A. (2017). *Power system optimization modeling in GAMS* (Vol. 78). Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-62350-4> ↑Ver página 20

[Tapias-Isaza *et al.*, 2011] Tapias-Isaza, C., Galeano-Ossa, A. e Hincapié-Isaza, R. (2011). Planeación de sistemas secundarios de distribución usando el algoritmo *branch and bound*. *Ingeniería y Ciencia*, 7(13), 47-64. ↑Ver página 20

[Zhang, 2013] Zhang, H. (2013). *Transmission expansion planning for large power systems*. Arizona State University. ↑Ver página 18



Producción de biodiésel a partir del aceite extraído de almendra del corozo *Bactris guineensis* asistida mediante ultrasonido de sonda directa

Biodiesel Production From Almond Oil Extracted From the Corozo *Bactris Guineensis* Assisted by Direct Probe Ultrasound

Juan Martín Madrid De la Rosa ¹, Dary Mendoza Meza ², Miriam Fontalvo Gómez ³

Fecha de Recepción: 14 de Diciembre de 2020

Fecha de Aceptación: 01 de Abril de 2021

Cómo citar: Madrid De la Rosa, J.M. Mendoza-Meza, D. y Fontalvo-Gómez, M. (2021). Producción de biodiesel a partir del aceite extraído de almendra del corozo *Bactris guineensis* asistida mediante ultrasonido de sonda directa. *Tecnura*, 25(69), 51-75. <https://doi.org/10.14483/22487638.15809>

Resumen

Contexto: Teniendo en cuenta que el corozo (*Bactris guineensis*) es una fruta exótica del Caribe colombiano utilizada localmente en la industria de los alimentos y que su almendra posee alto contenido oleaginoso (39,43 % ± 0,49), el presente trabajo busca abordar el aprovechamiento del aceite de la almendra del corozo como alternativa en la obtención de biodiésel de ultrasonido de sonda directa como medio de agitación.

Métodos: Los ensayos se llevaron a cabo bajo diferentes valores de relación molar alcohol: aceite, concentración de catalizador, amplitud de ultrasonido y tiempo. Para ello se utilizó un diseño central compuesto y se usó la variable de respuesta "rendimiento de reacción" para determinar las condiciones óptimas para la obtención de biodiésel.

Resultados: Se obtuvo un rendimiento máximo de reacción del 81,05 % una relación molar alcohol: aceite de 6:1; concentración de catalizador de 0,70 %; amplitud de la sonda de ultrasonido del 20 % y tiempo de reacción de 15 minutos.

Conclusiones: Se demostró que el producto final cumple con la mayoría de las propiedades señaladas por la norma técnica colombiana (NTC 5444). La implementación del ultrasonido de sonda directa permitió obtener altos rendimientos con tiempos de reacción inferiores a los reportados con los métodos convencionales de agitación, lo cual representa una oportunidad de reducir los gastos energéticos asociados con la producción del biocombustible. Adicionalmente, la diversificación de las materias primas para la fabricación de biodiésel con el aprovechamiento de los ácidos grasos extraídos de la biomasa residual de *B. guineensis*, representa una oportunidad para el impulso de la economía regional.

Palabras clave: aceite de corozo, transesterificación, ultrasonido, biocombustibles, desechos alimenticios, energía alternativa.

¹Ingeniero químico. Joven investigador de Colciencias en Universidad del Atlántico. Barranquilla, Colombia. Email: jmadrid@mail.uniatlantico.edu.co

²Química farmacéutica, doctora en Biotecnología. Docente de la Universidad del Atlántico. Barranquilla, Colombia. Pharmaceutical Chemist, PhD in Biotechnology. Professor at the Universidad del Atlántico. Barranquilla, Colombia. Email: darymendoza@mail.uniatlantico.edu.co

³Química farmacéutica, doctora en Química. Docente de la Universidad del Atlántico. Barranquilla, Colombia. Email: miriamfontalvo@mail.uniatlantico.edu.co

Abstract

Context: Corozo (*Bactris guineensis*) is an exotic fruit from the Colombian Caribbean. It is used locally in the food industry. Corozo has high oleaginous content (39, 43 % \pm 0, 49) and it could be an option for the oil industry in Colombia. This study shows the use of Corozo oil as an alternative for biodiesel production using ultrasound with a direct probe as the agitation mechanism.

Method: The experiments were carried out under different values to alcohol: oil molar ratio, catalyst concentration, ultrasound intensity, and reaction time. For this purpose, a central compound design was used as the response variable "reaction yield" was used to set the best conditions in biodiesel production.

Results: A maximum reaction yield (81, 05 %) was obtained using alcohol: oil molar ratio of 6:1; catalyst concentration of 0,70 %; the amplitude of the ultrasound probe of 20 % and the reaction time of 15 minutes.

Conclusions: It was found biodiesel fulfills most of the properties set by the Colombian technical standard (NTC 5444). Direct probe ultrasound shows high yields with times lower than those reported with conventional methods which represent an opportunity to reduce the energy cost associated with biofuel production. Additionally, the variation of raw materials for the manufacturing of biodiesel through the use of oils from the residual biomass of *B. guineensis* represents an opportunity to boost the regional economy.

Keywords: Corozo oil, transesterification, ultrasound, biofuels, food waste, alternative energy.

Tabla de Contenidos

	Página
Introducción	53
Metodología	54
Materia prima	54
Extracción de aceite de corozo	55
Refinación y caracterización	55
Producción de biodiesel	56
Purificación de biodiesel	56
Caracterización del producto obtenido	56
Caracterización cualitativa del biodiesel	56
Caracterización fisicoquímica del biodiesel	58
Análisis estadístico	58
Resultados	58
Extracción del aceite	58
Caracterización del aceite refinado	60
Producción de biodiesel	61
Caracterización cualitativa del biodiesel	65

Caracterización fisicoquímica del biodiesel	65
Conclusiones	68
Financiamiento	68
Agradecimientos	69
Referencias	69

Introducción

La propagación de gases nocivos en la atmósfera, producto del uso de combustibles fósiles, es un tema, que involucra a la población, la industria y la sociedad científica de cada país. Hoy en día, existe un gran compromiso por generar alternativas energéticas que ayuden a mitigar la necesidad de combustibles fósiles, con miras a reducir la carga de contaminación (Gaurav *et al.*, 2017, Flórez *et al.*, 2016). Los biocombustibles producidos a partir de materias primas renovables no convencionales surgieron desde hace algunos años, como una opción para mermar la presencia de gases invernadero en el ambiente (Esteves *et al.*, 2018, Rassoulinejad-Mousavi *et al.*, 2018, Andrade *et al.*, 2016). El biodiesel es un combustible renovable (Liu *et al.*, 2018) cuyo uso reduce la emisión CO₂, CO (Mejía y Cuty, 2019) y otros contaminantes (Thapa, Indrawan, y Bhoi, 2018); y que consiste principalmente en ésteres metílicos de ácidos grasos (EMAG) derivados de aceites vegetales por procesos de transesterificación o esterificación (Yu *et al.*, 2017).

En Colombia, el componente primario utilizado para la manufactura industrial de biodiesel es el aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*). Se estima que aproximadamente el 60% de la producción nacional de este aceite se destina al sector alimenticio, mientras que el 40% se utiliza para la producción de biocombustibles (Granados y Valencia, 2018). Este panorama ha generado una competencia entre la seguridad alimentaria y el sector energético (Martínez, Arango, y Giraldo, 2019), planteándose la necesidad de buscar materiales alternativos para la obtención de biodiesel; una opción es el aprovechamiento de la biomasa de plantas provenientes de los residuos de la agroindustria (Núñez, 2012, Romero *et al.*, 2016).

Por su ubicación geográfica, Colombia presenta una gran diversidad en plantas oleaginosas que podrían constituirse en muy buenas opciones para la industria de los aceites (Esquinas *et al.*, 2018, Teixeira *et al.*, 2018). Este recurso biológico ofrece una oportunidad magnífica para la exploración y desarrollo de biocombustibles a partir de materiales no convencionales que, a su vez, no son aptas para el consumo humano o que son consideradas material de desecho. Según (Durán *et al.*, 2018), Colombia produce cerca de 12 millones de toneladas de desechos; 53% proceden de residuos agroindustriales como frutas y cáscaras; mucha de esta biomasa residual posee alto contenido en aceite, razón por la

cual puede ser aprovechada por el sector energético (Amaringo y Hormaza, 2018) para la elaboración de productos de valor, entre ellos el biodiesel (Rojas, Flórez, y López, 2019).

El corozo (*Bactris guineensis* (L.) H.E. Moore 1963; familia: Arecaceae) es una palma que se cultiva en el Caribe Colombiano. Su fruto es utilizado en las industrias fruteras para la producción de jugos y mermeladas (Bernal y Galeano, 2013), proceso en el cual se genera una cantidad considerable de biomasa residual que es desaprovechada. Esta biomasa se compone principalmente de la cáscara y de la almendra húmeda de corozo; esta última posee un contenido importante de triacilglicéridos (TAG), entre 39 - 40 % (Polo *et al.*, 2018). El alto contenido de TAG es un parámetro determinante en la selección de materiales potenciales para la obtención de energía renovable puesto que proporciona información acerca de la productividad de aceite por hectárea sembrada (Durišić-Mladenović *et al.*, 2018).

En el presente estudio se propuso utilizar los residuos del corozo provenientes de algunas fruteras locales, para la obtención de biodiesel por transesterificación convencional, implementando la técnica de mezclado con ultrasonido de sonda. Estudios previos demuestran que este sistema de agitación acelera la reacción de transesterificación debido al aumento de colisiones entre los reactivos como resultado de vibraciones y turbulencias derivadas de un fenómeno conocido como cavitación (Patle *et al.*, 2018), lo que supone una reducción en el tiempo de reacción y en consecuencia un menor gasto energético. La transesterificación asistida por ultrasonido ha sido usada en la transformación de aceites vegetales comestibles (e.g. aceite de canola, maíz, palma, soya y girasol) a biodiesel, obteniéndose rendimientos que van desde el 30 - 99 %, dependiendo de las condiciones de reacción (Veljković *et al.*, 2012). Las principales variables que se han asociado al rendimiento son: calidad de material, alcohol utilizado, relación molar alcohol: aceite, temperatura de reacción y parámetros de operación de ultrasonido. Como ejemplo, un estudio previo reportó rendimiento superior de 99,4 % en la transesterificación alcalina del aceite de soya usando una relación molar alcohol: aceite de 6:1, temperatura de 40°C, 15 minutos de reacción y agitación de ultrasonido (Colucci *et al.*, 2005).

La intención de la presente investigación fue evaluar las condiciones del proceso de elaboración y manufactura del biodiesel usando aceite de corozo (*Bactris guineensis*) como materia prima e implementando agitación de ultrasonido de sonda directa. Los datos obtenidos fueron ajustados al método de superficie de respuesta para obtener las combinaciones de puntos óptimos que generan el máximo rendimiento.

Metodología

Materia prima

Los desechos del fruto de corozo (*B. guineensis*) fueron colectados en las fruteras cercanas al campus de la Universidad del Atlántico, municipio de Puerto Colombia (10°58'59" de latitud norte;

Tabla 1. Diseño experimental 2³ para la extracción por método Soxhlet

Tratamientos	Cantidad de materia prima (g)	Tiempo de extracción (h)	Tamaño de partícula (μ)
1	30	2	500
2	60	2	500
3	30	5	500
4	60	5	500
5	30	2	1000
6	60	2	1000
7	30	5	1000
8	60	5	1000

Fuente: elaboración propia.

74°57'0" de longitud Oeste), departamento del Atlántico. Los frutos fueron despulpados y secados al natural para facilitar la separación manual de la almendra; posteriormente, descascarados y molidos para disminuir el tamaño de partícula mediante un molino de martillos, hasta obtener una harina con tamaño de partícula fino (1000 y 500 micras). Finalmente, la harina fue secada en horno a 100°C por dos horas.

Extracción de aceite de corozo

La extracción se realizó utilizando un extractor Soxhlet de 100 mL. El solvente de extracción fue hexano (pureza de 98,5 %). La tabla 1 ilustra el diseño factorial 2^k(k=3) que se aplicó para obtener las mejores condiciones de extracción. Las variables independientes fueron: "cantidad de materia prima (g)", "tiempo de extracción (h)" y "tamaño de partícula (micras, μ)"; la variable respuesta fue "rendimiento de extracción (% p/p)". La extracción se llevó a cabo a temperatura constante (80 °C). La cantidad de solvente en cada extracción fue 120 ml. Los análisis se realizaron por duplicado.

Refinación y caracterización

El aceite crudo obtenido bajo las mejores condiciones de extracción, fue refinado parcialmente con un proceso de desgomado según procedimiento descrito previamente (Hernández *et al.*, 2007) para obtener un aceite libre de fosfátidos hidratables y no hidratables. Para la caracterización del aceite refinado se determinaron las propiedades: densidad, índice de acidez e índice de yodo; de acuerdo a

las normas técnicas colombianas NTC 336, 218 y 283 (ICONTEC, 2016).

Producción de biodiesel

La reacción se efectuó en un vaso de precipitados de 100 ml. Se empleó metanol como donador de alquilo e hidróxido de potasio (KOH; pureza >85 %) como catalizador. La reacción se desarrolló usando ultrasonido de sonda directa como medio de agitación. El equipo completo de agitación estaba conformado por un procesador de ultrasonido QSONICA Q500, con una potencia nominal de salida de 500W y frecuencia de 20 kHz, provisto de un generador, convertidor, cable convertidor y la sonda (13 mm de diámetro). Se usó un diseño central compuesto con 4 factores y 3 bloques para evaluar la incidencia de los parámetros, en el rendimiento de la transesterificación. El diseño generó 27 corridas con el punto central por cada bloque (tabla 2). Se evaluó el rendimiento de la reacción como la razón entre la cantidad de EMAG producido y la masa de aceite utilizada inicialmente (% p/p). La cantidad de catalizador adicionada fue calculada respecto a la cantidad de aceite usado (% p/p). Para todas las reacciones se usó 20 g de aceite de corozo.

Purificación de biodiesel

El biodiesel obtenido en cada reacción fue purificado mediante el procedimiento descrito previamente (patente WO2016098025A1) (Argentina Patente n° WO2016098025A1, 2016). Finalizada la reacción, se adicionó agua al producto en una proporción de 5 % p/v respecto del aceite de partida. Dicha mezcla se mantuvo en agitación a una temperatura de 60 °C durante 40 minutos. Luego se pasó a decantación a una temperatura de 60 °C, y se separó la fase de biodiesel. Luego, a esta fase se añadió, una solución de ácido cítrico 3 % p/p en una proporción de 10 % p/v respecto del aceite de partida y se realizó decantación a una temperatura de 60 °C, recuperando la fase que contiene el biodiesel. Posteriormente se añadió agua (pH: 7,0) en una proporción de 10 % p/v respecto del aceite de partida. Finalmente se secó el producto a una temperatura de entre 80 °C y 110 °C durante 45 minutos.

Caracterización del producto obtenido

Caracterización cualitativa del biodiesel

Cada una de las reacciones se caracterizó a través de espectroscopia de infrarrojo medio/reflexión total atenuada (MIR/ATR). Se utilizó un espectrofotómetro BRUKER modelo ALPHA, con una resolución 8 nm y una media correspondiente a 32 scans. El tiempo utilizado para obtener los espectros MIR fue de 48 segundos. Este equipo estaba conectado a una computadora equipada con un software que permite importar los datos de los espectros obtenidos. Se compararon los espectros de los

Tabla 2. Diseño experimental central compuesto para la transesterificación

Corridas	Relación molar alcohol: aceite.	Catalizador (% p/p)	Amplitud (%)	Tiempo (min)	x1	x2	x3	x4
	Factores				Codificación de las variables			
1	6,0	1,5	20,0	15,0	-1	+1	-1	-1
2	6,0	0,7	30,0	15,0	-1	-1	+1	-1
3	6,0	0,7	20,0	30,0	-1	-1	-1	+1
4	6,0	1,5	30,0	30,0	-1	+1	+1	+1
5	7,5	1,1	25,0	22,5	0	0	0	0
6	9,0	0,7	20,0	15,0	+1	-1	-1	-1
7	9,0	1,5	30,0	15,0	+1	+1	+1	-1
8	9,0	1,5	20,0	30,0	+1	+1	-1	+1
9	9,0	0,7	30,0	30,0	+1	-1	+1	+1
10	6,0	0,7	20,0	15,0	-1	-1	-1	-1
11	6,0	1,5	30,0	15,0	-1	+1	+1	-1
12	6,0	1,5	20,0	30,0	-1	+1	-1	+1
13	6,0	0,7	30,0	30,0	-1	-1	+1	+1
14	7,5	1,1	25,0	22,5	0	0	0	0
15	9,0	1,5	20,0	15,0	+1	+1	-1	-1
16	9,0	0,7	30,0	15,0	+1	-1	+1	-1
17	9,0	0,7	20,0	30,0	+1	-1	-1	+1
18	9,0	1,5	30,0	30,0	+1	+1	+1	+1
19	4,5*	1,1	25,0	22,5	-2	0	0	0
20	7,5	0,3*	25,0	22,5	0	-2	0	0
21	7,5	1,9*	25,0	22,5	0	+2	0	0
22	7,5	1,1	25,0	22,5	0	0	0	0
23	7,5	1,1	15,0*	22,5	0	0	-2	0
24	7,5	1,1	35,0*	22,5	0	0	+2	0
25	7,5	1,1	25,0	7,5*	0	0	0	-2
26	7,5	1,1	25,0	37,5*	0	0	0	+2
27	10,5*	1,1	25,0	22,5	+2	0	0	0

*Puntos axiales definidos por el diseño.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Normas técnicas colombianas para caracterización de biodiesel

Propiedad	Unidad	Método de ensayo
Densidad a 15 °C	kg/m ³	ASTM D4052
Número ácido	mg KOH/g	ASTM D664
Contenido en metanol	% (m/m)	ISO 14110
Contenido en monoglicéridos	% (m/m)	ISO 14105
Contenido en diglicéridos	% (m/m)	ISO 14105
Contenido en triglicéridos	% (m/m)	ISO1410
Glicerina libre	% (m/m)	ISO 14105
Glicerina total	% (m/m)	ISO 14105

Fuente: elaboración propia.

productos de las reacciones experimentales, un espectro de una muestra de biodiesel de palma y un espectro de una muestra de aceite de corozo.

Caracterización fisicoquímica del biodiesel

El biodiesel fue caracterizado según los procedimientos señalados en la norma nacional vigente NTC 5444 y los valores conseguidos fueron comparados con los establecidos en dicha legislación, tal como se detalla en la tabla 3.

Análisis estadístico

Los datos experimentales obtenidos para cada una de los diseños experimentales se analizaron con el software Statgraphics Centurion (XV) 16.1.15. Se aplicó análisis de varianza (Anova) para estimar el impacto de cada uno de los factores principales y sus interacciones sobre la variable de respuesta estudiada (rendimiento de extracción y rendimiento de reacción), con un nivel de confianza del 95 %.

Resultados

Extracción del aceite

La tabla 4 presenta los rendimientos de extracción del aceite de corozo con el método Soxhlet, bajo las diferentes condiciones experimentales.

Tabla 4. Resultados del diseño experimental 2³ para la extracción del aceite de corozo

Tratamiento	Cantidad de materia prima (g)	Tiempo de extracción (h)	Tamaño de partícula (μ)	Rendimiento de extracción (% p/p) (media \pm DE)*
1	30	2	500	39,43 \pm 0,49
2	60	2	500	36,94 \pm 0,11
3	30	5	500	38,04 \pm 0,55
4	60	5	500	39,27 \pm 0,77
5	30	2	1000	35,96 \pm 0,48
6	60	2	1000	34,89 \pm 0,25
7	30	5	1000	36,06 \pm 0,88
8	60	5	1000	38,58 \pm 0,16

*El volumen de solvente gastado durante cada extracción fue de 120 ml

Fuente: elaboración propia.

El Anova mostró que el tamaño de partícula de la materia prima (harina de la almendra de corozo) influye significativamente (Anova: $F = 58,77$; valor- $p = 0,0001$) en la variable respuesta "rendimiento de extracción del aceite", observándose un efecto negativo. Los rendimientos más altos se obtuvieron con el menor tamaño de partícula (500 μ), confirmándose que al incrementar la superficie de contacto entre el solvente y el soluto se incrementa la difusión del aceite, lo que favorece la extracción (Fariás y Matos, 2009). El tiempo de extracción también contribuyó significativamente en el rendimiento de extracción (Anova: $F = 20,08$; valor- $p = 0,002$), obteniéndose una relación positiva entre este factor y la variable respuesta, por lo que se deduce que un mayor tiempo de contacto entre el soluto y el solvente lleva a la obtención de una mayor concentración del producto deseado (Cardona, Ríos, y Restrepo, 2006). Las interacciones entre "tamaño de partícula" y "tiempo de extracción" (Anova: $F=7,27$; valor- $p=0,03$) y entre "tamaño de partícula" y "cantidad de materia prima" (Anova: $F=6,53$; valor- $p=0,03$) también tuvieron efecto significativo sobre el rendimiento de extracción (Figura 1). Por otra parte, la cantidad de materia prima no tuvo influencia significativa sobre el rendimiento de la extracción del aceite (Anova: $F = 0,04$; valor- $p = 0,85$), bajo las condiciones experimentales estudiadas; no obstante, la interacción "cantidad de materia prima" y "tiempo de extracción" influyó significativamente en el rendimiento (Anova: $F = 47,42$; valor- $p = 0,0001$). Por lo tanto, las mejores condiciones fueron: cantidad de materia prima de 30 g, tiempo de extracción 2 h y tamaño de partícula de 500 μ . Estas fueron las condiciones usadas para obtener el aceite usado para la transesterificación.

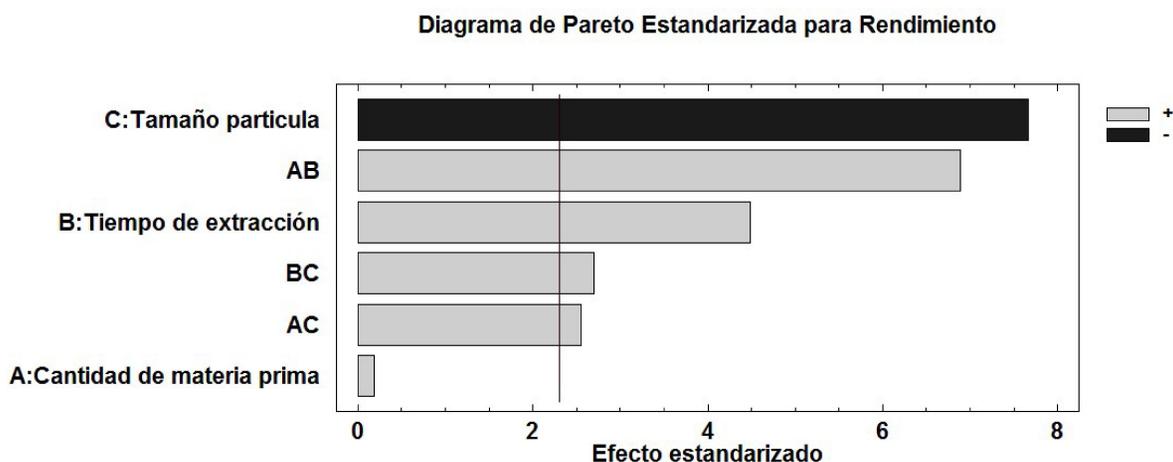


Figura 1. Gráfica de Pareto estandarizado para el diseño experimental 2^3 para la extracción del aceite de corozo

Fuente: elaboración propia.

Caracterización del aceite refinado

La tabla 5 contiene los resultados de la caracterización realizada al aceite refinado de corozo.

Tabla 5. Propiedades físicoquímicas del aceite de corozo

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad	$0,90 \pm 0,0024$	g/mL
Acidez	$0,36 \pm 0,01$	% de ácido láurico
Índice de acidez	$1,02 \pm 0,02$	mg KOH/g de muestra
Índice de yodo	$4,47 \pm 0,45$	g de I_2 /100 g de muestra

Fuente: elaboración propia.

La densidad, índice de acidez e índice de yodo son parámetros a considerarse en la caracterización del aceite destinado a la obtención de biodiesel (Tacias *et al.*, 2016). La densidad del aceite de corozo a 25°C (0,901 g/ml) fue consistente a la reportada previamente por (Polo *et al.*, 2018); además, fue similar a la descrita para los aceites de palma africana (0,925 g/ml a 25°C) (Albis *et al.*, 2005), palma de coco (0,917 g/ml), aceite de colza (0,905 g/ml a 25°C) y aceite de soya (0,916 g/ml) (Sahasrabudhe *et al.*, 2017).

El índice de acidez fue de 0,36 % (expresado en porcentaje de ácido láurico). Este parámetro de-

termina la cuantía de ácidos grasos libres que contiene el aceite (Rivera *et al.*, 2014) y define el proceso que se debe seguir para la transesterificación. Aceites con valores de índice de acidez superior al 1 % requieren un tratamiento previo de esterificación de ácidos grasos libres, para evitar formación de jabones (Phan y Phan, 2008). Los jabones y otros sub-productos en el biodiesel dificultan las técnicas de recuperación y purificación del biocombustible, por tal razón su formación debe evitarse (Tacias *et al.*, 2016).

El índice de yodo, es la medida de insaturaciones en el aceite (González *et al.*, 2012). Según (Toscano y Maldini, 2007) los aceites destinados a la producción de biodiesel deberán tener valores de índice de yodo menores o iguales a 120 g de I₂/100 g de muestra. El aceite de corozo obtenido en el presente estudio mostró un valor de índice de yodo de 4,47 g de I₂/100 g de muestra, lo que indica un bajo contenido de ácidos grasos insaturados, haciéndolo menos susceptible a la oxidación (Benjumea *et al.*, 2009). Por otra parte, el nivel de insaturación del biodiesel tiene una relación inversa con el índice de cetano; es decir, a menor índice de yodo mayor índice de cetano y en consecuencia una mejor calidad de ignición del biocombustible en los motores diésel (Lamaisri *et al.*, 2015). Por tanto, un aceite con índice de yodo bajo será más conveniente para la producción biodiesel.

Producción de biodiesel

La tabla 6 muestra los resultados experimentales obtenidos con el diseño central compuesto para establecer las mejores condiciones de reacción en la transesterificación asistida por ultrasonido del aceite de almendra de corozo.

El Anova mostró un efecto significativo de la variable “concentración de catalizador” en el rendimiento de reacción (Anova: F = 7,96; valor-p = 0,02); también manifestó un efecto cuadrático significativo de la variable “Tiempo de reacción” (Anova: F = 10,31; valor-p = 0,01) Las otras variables estudiadas, “relación molar alcohol: aceite” (Anova: F = 3,23; valor-p: 0,10) y “amplitud del ultrasonido” (Anova: F = 2,05; valor-p = 0,18), no influyeron significativamente en el rendimiento, con un intervalo de confianza del 95 %, ilustrado en la Figura 2.

El efecto de la concentración de catalizador sobre el rendimiento de la reacción de transesterificación se ha descrito previamente (Atadashi *et al.*, 2013) estableciendo que elevadas concentraciones de KOH disminuyen el rendimiento de los metilésteres y propicia la aparición de jabones a causa de la saponificación de los ácidos grasos en presencia de agua (Ruiz *et al.*, 2016). El gráfico de Pareto (Figura 2) indica un efecto negativo de la concentración de KOH sobre el rendimiento de reacción, lo cual está en proporción a lo reportado en la literatura para diferentes aceites vegetales. Con el aceite de corozo el porcentaje de conversión más alto (81,05 %) se obtuvo con 0,70 % de KOH, mientras que el más bajo (67,41 %) se obtuvo con 1,1 % de KOH. Este resultado fue similar al reportado por (Stavarache *et al.*, 2003) quienes obtuvieron rendimientos entre 75-98 % con 0,50 % en peso de NaOH como catalizador y una relación alcohol: aceite de 6:1, usando agitación con sonda de ultrasonido a 40 kHz de frecuencia.

Tabla 6. Resultados del diseño central compuesto para la transesterificación

Corrida	Relación molar alcohol: aceite.	Catalizador (% p/p)	Amplitud (%)	Tiempo (min)	Rendimiento de reacción (% p/p)
1	6,0	1,5	20,0	15,0	80,58
2	6,0	0,7	30,0	15,0	78,84
3	6,0	0,7	20,0	30,0	78,09
4	6,0	1,5	30,0	30,0	70,95
5	7,5	1,1	25,0	22,5	78,34
6	9,0	0,7	20,0	15,0	79,95
7	9,0	1,5	30,0	15,0	70,89
8	9,0	1,5	20,0	30,0	76,18
9	9,0	0,7	30,0	30,0	78,48
10	6,0	0,7	20,0	15,0	81,05
11	6,0	1,5	30,0	15,0	77,02
12	6,0	1,5	20,0	30,0	77,46
13	6,0	0,7	30,0	30,0	77,94
14	7,5	1,1	25,0	22,5	77,45
15	9,0	1,5	20,0	15,0	73,82
16	9,0	0,7	30,0	15,0	80,34
17	9,0	0,7	20,0	30,0	79,03
18	9,0	1,5	30,0	30,0	73,24
19	4,5	1,1	25,0	22,5	79,27
20	7,5	0,3	25,0	22,5	75,91
21	7,5	1,9	25,0	22,5	75,76
22	7,5	1,1	25,0	22,5	78,48
23	7,5	1,1	15,0	22,5	71,67
24	7,5	1,1	35,0	22,5	72,30
25	7,5	1,1	25,0	7,5	69,94
26	7,5	1,1	25,0	37,5	67,41
27	10,5	1,1	25,0	22,5	73,48

Fuente: elaboración propia.

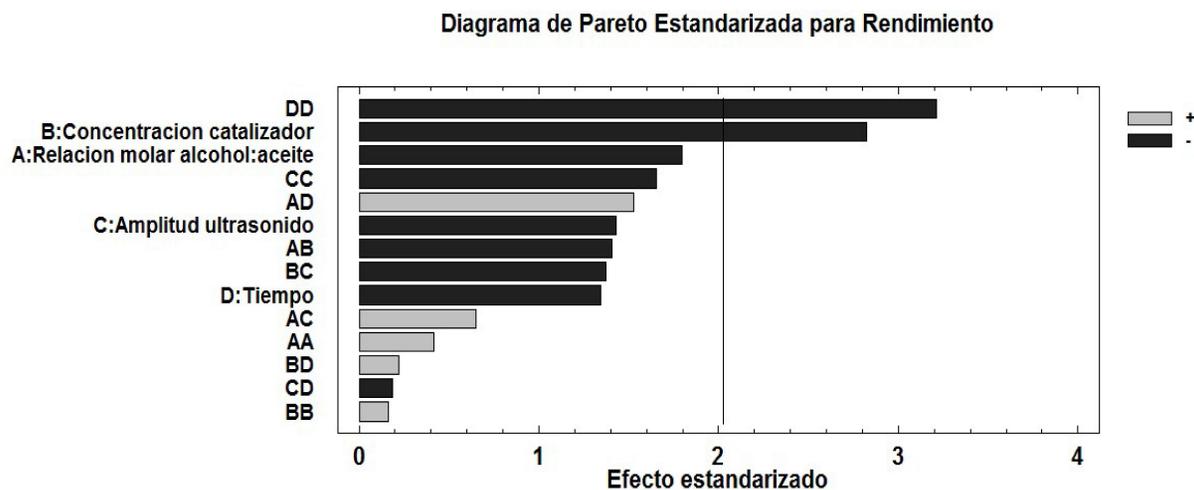


Figura 2. Gráfica de Pareto estandarizado para el diseño central compuesto para la transesterificación de aceite

Fuente: elaboración propia.

En cuanto al tiempo, el gráfico de Pareto (Figura 2) mostró un efecto negativo de esta variable sobre la reacción, obteniéndose el rendimiento más alto en 15 minutos de reacción. Estudios previos revelan que en general, la formación de FAMES es considerable en los primeros minutos de reacción (con agitación constante y condiciones óptimas), pero es aproximadamente inexistente después de 90 minutos (Torres *et al.*, 2017), así lo confirman (Fontalvo *et al.*, 2013), quienes evaluaron el desarrollo de la transesterificación alcalina del aceite de canola mediante espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) y Raman de forma simultánea, encontrando que los cambios espectrales más significativos ocurren durante los primeros 40 minutos de reacción, después de este tiempo, los cambios son menos marcados. (Topare *et al.*, 2019), reportaron rendimientos superiores al 80% entre 15 - 40 minutos de la transesterificación asistida por ultrasonido de aceite de soja usando KOH como catalizador. (Encinar *et al.*, 2018) obtuvieron rendimientos de reacción del 95% en la transesterificación del aceite de colza usando una potencia ultrasónica de 320 W, concentración de catalizador KOH del 0,7%, y una relación molar alcohol: aceite 9:1. Estos comportamientos son consistentes con los obtenidos en el presente estudio.

Aunque bajo las condiciones experimentales del presente estudio, el modelo estadístico mostró un efecto no significativo de la variable "amplitud del ultrasonido", en la gráfica de superficie de respuesta se observa que a mayor amplitud los rendimientos de reacción disminuyen (Figura 3). Estudios previos han demostrado que el mezclado por ultrasonido puede incidir positivamente en el proceso de transesterificación. Las ondas ultrasónicas generan cavitación, que consiste en el surgimiento, aumento y ruptura implosiva de burbujas dentro del líquido irradiado (Veljković *et al.*,

Nota: las variables relación molar alcohol-aceite y el tiempo de reacción se fijaron en los valores centrales del modelo

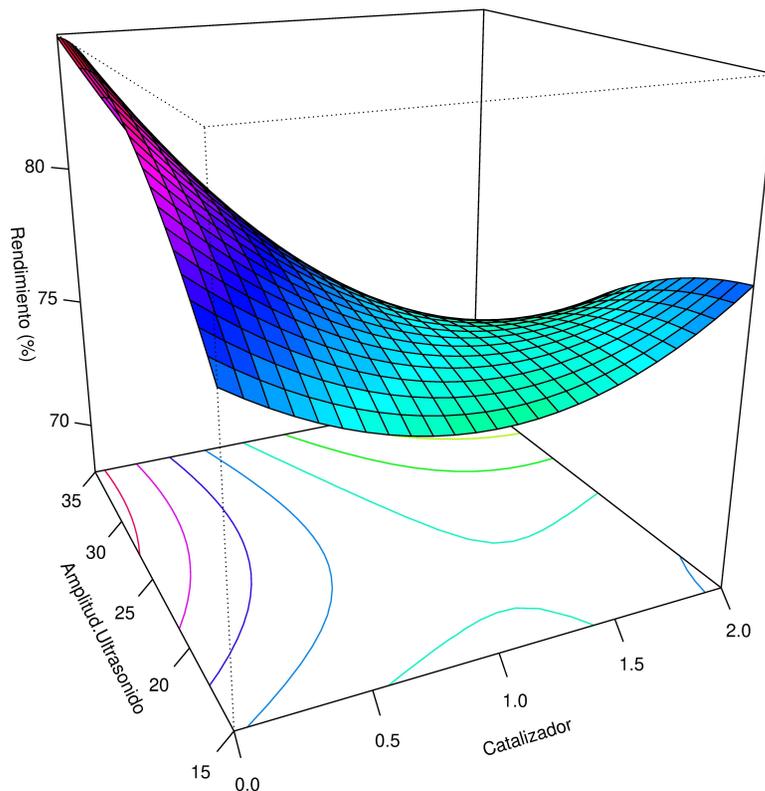


Figura 3. Superficie de respuesta estimada para el rendimiento de reacción de transesterificación del aceite de corozo (*Bactris guineensis*)

Fuente: elaboración propia.

2012, Colucci *et al.*, 2005). Las burbujas de cavitación dan lugar a la micro-mezcla entre las fases del aceite y metanol, lo que incrementa la transferencia de masa y calor entre reactivos favoreciendo la formación de FAME. No obstante, valores altos de amplitud ultrasónica o potencias ultrasónicas aplicadas por largos intervalos de tiempo pueden destruir el efecto de cavitación (Sun *et al.*, 2018), ocasionando pérdida de la homogeneización de los componentes iniciales y, en consecuencia, una disminución del rendimiento final de la transesterificación.

La relación molar alcohol: aceite es otro de los factores que hay que ajustar en la reacción. La estequiometría de la transesterificación indica que esta relación debe ser 3 moles de metanol por cada mol de aceite (3:1). Sin embargo, al ser la transesterificación una reacción reversible, se requiere de una relación alcohol: aceite mayor para potenciar la formación de productos (Lee y Saka, 2010), aumentar la solubilidad entre reactivos y favorecer el choque efectivo entre las fases de triglicérido y el

alcohol (Musa, 2016). En el presente estudio, el mayor rendimiento experimental (81,05 %) se obtuvo usando una relación molar alcohol: aceite de 6:1 y 15 minutos de reacción asistida por ultrasonido. Este resultado es comparable al obtenido por (Stavarache *et al.*, 2006), y (Fan *et al.*, 2010), quienes lograron obtener conversiones de biodiesel del 98 % usando una relación molar alcohol: aceite de 6:1, en 20 y 8 min de irradiación de ultrasonido, respectivamente.

Caracterización cualitativa del biodiesel

El biodiesel de corozo obtenido bajo las mejores condiciones de reacción se caracterizó inicialmente por espectroscopía MIR/ATR. La figura 4 presenta una comparación de los espectros del aceite de corozo, biodiesel de corozo y biodiesel de palma; este último utilizado como referencia para el biodiesel de corozo.

La tabla 7 muestra las regiones del espectro MIR que caracterizan al aceite de corozo y sus metilésteres. Se destaca una señal a 1436 cm^{-1} , propia de la deformación asimétrica del grupo $\text{O}=\text{C}-\text{O}-\text{CH}_3$, la cual es característica del biodiesel (Andrade *et al.*, 2016) y está ausente en el espectro de aceite, lo que confirma la conversión de los acilglicéridos en FAMES. Por otra parte, la señal de 1378 cm^{-1} correspondiente a las vibraciones de flexión de los grupos CH_2 y CH_3 (Jović, 2016) se encontró únicamente en el aceite de corozo.

Caracterización fisicoquímica del biodiesel

Se evaluaron algunas propiedades de calidad del biodiesel (Ver Tabla 8). Los análisis fueron realizados de acuerdo a protocolos establecidos en la empresa Biocombustibles Sostenibles del Caribe (BIOSC) y se interpretaron de acuerdo a lo establecido en la norma NTC 5444 del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

Densidad: El valor de la densidad del biodiesel de corozo está dentro de lo establecido por la norma. Valores por fuera del estándar podrían generar dificultades en el proceso de combustión (Arias *et al.*, 2011) ya que la densidad es una propiedad que influye en la cantidad de masa de combustible que es inyectada al motor (Pratas *et al.*, 2011).

Número ácido: Un combustible con un alto valor de número ácido tiende a corroer el tanque de combustible y las tuberías del motor, además, dicha acidez aumenta con el tiempo de almacenamiento (Kakati y Gogoi, 2016). El valor de ácido del biodiesel de corozo (*Bactris guineensis*) cumple con el límite establecido por la norma NTC 5444 y es bajo comparado con lo obtenido de especies como *Jatropha Curcas* (0,40 mg KOH/g) (Kumar *et al.*, 2007) y *Karanja* (0,23 mg KOH/g) (Sahoo y Das, 2009).

Contenido de monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos: El valor del contenido de monoglicéridos fue de 0,18 % m/m; menor al límite máximo recomendado por la norma (0,80 %m/m). Por otro lado, tanto el contenido de diglicéridos como el contenido de triglicéridos tuvieron ambos un valor de

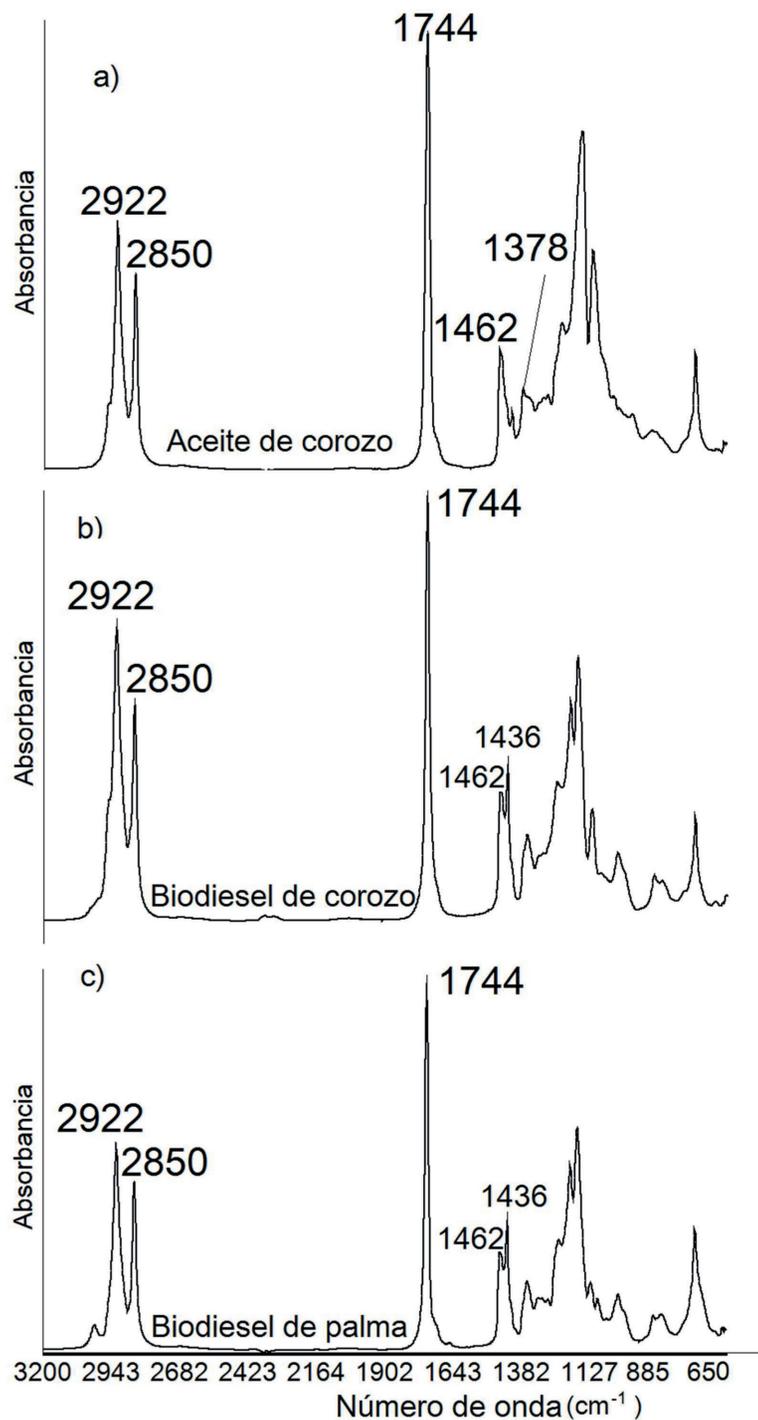


Figura 4. Comparación de los espectros MIR del a) aceite de corozo, b) biodiésel del corozo y c) biodiésel de palma

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Regiones características del espectro de aceite y biodiesel de corozo

Región	Rango de número de onda (cm^{-1})	Tipo de vibración	Absorción (cm^{-1})		
			Aceite de corozo	Biodiésel de corozo	Biodiésel de palma
1	2809-3012	vas (CH_2) y vs correspondiente a grupos metileno	2922-2850	2922-2850	2922-2850
2	1763-1712	$\nu(>\text{C}=\text{O})$ correspondiente a ésteres	1744	1744	1744
3	1425-1477	vas ($\text{O}-\text{CH}_3$) correspondiente a los metilésteres	1436	No detectado	No detectado
		$\delta_{\text{as}}(\text{CH}_2)/\delta_{\text{as}}(\text{CH}_3)$ correspondiente a los grupos metileno	1462	1462	1462
4	1370-1400	vas ($\text{O}-\text{CH}_2$) correspondiente de glicerol, triacilglicéridos, diacilglicéridos y monoacilglicéridos	1378	No detectado	No detectado
5	1357-1423	$\nu(\text{C}-\text{O})$ asignado COO^- grupos de ácidos carboxílicos	1415	1360	1362

Notas:

a. ν =Extensión, δ =flexión, as = asimétrica, s =simétrica.

b. Los rangos de longitud de onda (cm^{-1}) se basan en datos reportados en estudios similares

Fuente: (Dilek *et al.*, 2012, Mahamuni y Adewuyi, 2009).

0,03 %m/m e igualmente cumplen con los requerimientos exigidos por la normativa vigente.

Tabla 8. Valores de las propiedades fisicoquímicas del biodiésel de corozo comparados con la norma nacional vigente

Propiedad	Unidad	Valor	Valor norma
Densidad a 15 °C	kg/m ³	870	860-900
Número ácido	mg KOH/g	0,12	0,50
Contenido en metanol	% (m/m)	0,04	0,20
Contenido en monoglicéridos	% (m/m)	0,18	0,80
Contenido en diglicéridos	% (m/m)	0,03	0,20
Contenido en triglicéridos	% (m/m)	0,03	0,20
Glicerina libre	% (m/m)	0,45	0,02
Glicerina total	% (m/m)	0,51	0,25

Fuente: NTC 5444 ([ICONTEC, 2016](#)), NTC 5444, Biodiesel para uso en motores diesel, 2006).

Conclusiones

En este estudio, se optimizaron las condiciones de extracción del aceite de la almendra de corozo (*Bactris guineensis*) a partir de la biomasa residual del fruto, demostrando el valor agregado que se le puede dar a este recurso natural. El aceite de corozo fue apto para la producción de FAME a través de catálisis básica usando agitación con ultrasonido por sonda directa, obteniéndose un rendimiento de reacción máximo de 81,05 % p/p. A través de un diseño experimental de superficie de respuesta central compuesto se determinó que, bajo las condiciones experimentales usadas, la concentración de catalizador y el tiempo de reacción son los factores con mayor repercusión en el rendimiento de la reacción de transesterificación. La agitación con sonda de ultrasonido permitió reducir los gastos energéticos asociados con la producción del biocombustible (rendimientos superiores de 70 % en 15 minutos). Las propiedades del producto final cumplieron los procedimientos establecidos en la norma técnica colombiana 5444.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado con recursos del proyecto “Desarrollo de metodologías ecoamigables para el aprovechamiento de residuos generados en diversas industrias de la Región del Caribe colombiano, de la séptima convocatoria interna para el fortalecimiento de los grupos de investigación” y con el apoyo del programa Jóvenes Investigadores de Colciencias, Convocatoria “N° 775 de 2017”.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa Biocombustibles Sostenibles del Caribe (BIOSC) por el apoyo técnico en los análisis fisicoquímicos de calidad del biodiesel de corozo.

Referencias

- [ICONTEC, 2016] (ICONTEC), I. C. (2006). *NTC 5444, Biodiesel para uso en motores diesel*. Bogotá: ICONTEC. ↑Ver página 68
- [ICONTEC, 2016] (ICONTEC), I. C. (2016). NTC 254. Bogotá: ICONTEC. Obtenido de <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC254.pdf> ↑Ver página 56
- [Albis *et al.*, 2005] Albis, A., Parra, J., y Sánchez, F. (2005). Transesterificación del aceite de palma con metanol por catálisis heterogénea. *Ingeniería e Investigación*, 25 (2), 71-77. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092005000200009&script=sci_abstract&lng=es ↑Ver página 60
- [Amaringo y Hormaza, 2018] Amaringo, F., y Hormaza, A. (2018). Adsorción de rojo 40 sobre cascarrilla de arroz: determinación del equilibrio, cinética y termodinámica. *Tecnura*, 22(56), 13–28. doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.12961> ↑Ver página 54
- [Andrade *et al.*, 2016] Andrade, M., Parussulo, A., Netto, C., Andrade, L., y Toma, H. (2016). Lipase immobilized on polydopamine-coated magnetite nanoparticles for biodiesel production from soybean oil. *Biofuel Research Journal*, 3(2), 403-409. doi: <https://doi.org/10.18331/BRJ2016.3.2.5> ↑Ver página 53, 65
- [Arias *et al.*, 2011] Arias, D., E., Teuta, C., y Parra, J. (2011). Caracterización de las propiedades del biodiesel de girasol bajo la Norma NTC de 100/04 y medición de poder calorífico. *Revista Avances Investigación en Ingeniería*, 8(2), 73-80. Obtenido de <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/2709/2129> ↑Ver página 65
- [Atadashi *et al.*, 2013] Atadashi, I., Aroua, M., Abdul, A., y Sulaiman, N. (2013). The effects of catalysts in biodiesel production: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19 (1), 14-26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.07.009> ↑Ver página 61
- [Benjumea *et al.*, 2009] Benjumea, P., Agudelo, J., y Ríos, L. (2009). *Biodiésel: Producción, calidad y caracterización*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia. ↑Ver página 61
- [Bernal y Galeano, 2013] Bernal, R., y Galeano, G. (2013). *Cosechar sin destruir - Aprovechamiento sostenible de palmas colombianas*. Bogotá: Facultad de Ciencias-Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. ↑Ver página 54

- [Cardona, Ríos, y Restrepo, 2006] Cardona, E., Ríos, L., y Restrepo, G. (2006). Extracción del carotenoide licopeno del tomate chonto (*Lycopersicum esculentum*). *Vitae*, 13(2), 44-53. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0121-40042006000200006 ↑Ver página 59
- [Colucci *et al.*, 2005] Colucci, J., Borrero, E., y Alape, F. (2005). Biodiesel from an alkaline transesterification reaction of soybean oil using ultrasonic mixing. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 82(7), 525-530. doi <https://doi.org/10.1007/s11746-005-1104-3> ↑Ver página 54, 63
- [Dilek *et al.*, 2012] Dilek, D., Udoh, A., Ozer, T., Akbulut, A., Erkaya, I., Yildiz, K., y Guler, D. (2012). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy for identification of *Chlorella vulgaris* Beijerinck 1890 and *Scenedesmus obliquus* (Turpin) Kützing 1833. *African Journal of Biotechnology*, 11(16), 3817-3824. doi: <https://doi.org/10.5897/AJB11.1863> ↑Ver página 67
- [Durán *et al.*, 2018] Durán, D., Figueroa, Á., Gualdrón, M. A., y Sierra, R. (2018). Potential of tropical fruit waste in bioenergy processes and bioproducts design. *26th European Biomass Conference and Exhibition* (págs. 166-174). Copenhagen: ResearchGate. doi:10.5071/26thEUBCE2018-1AV.2.18 ↑Ver página 53
- [Durišić-Mladenović *et al.*, 2018] Durišić-Mladenović, N., Kiss, F., Škrbić, B., Tomić, M., Mičić, R., y Predojević, Z. (2018). Current state of the biodiesel production and the indigenous feedstock potential in Serbia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(1), 280-291. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.059> ↑Ver página 54
- [Encinar *et al.*, 2018] Encinar, J., Pardal, A., Sánchez, N., y Nogales, S. (2018). Biodiesel by Transesterification of Rapeseed Oil Using Ultrasound: A Kinetic Study of Base-Catalysed Reactions. *Energies*, 11(1), 2229-2242. doi: <https://doi.org/10.3390/en11092229> ↑Ver página 63
- [Esquinas *et al.*, 2018] Esquinas, N., Márquez, G., Permanyer, A., y Gallego, J. (2018). Geochemical evaluation of crude oils from the caracara and tiple areas, eastern llanos basin, Colombia: palaeo biodegradation and oil mixing. *Journal of Petroleum Geology*, 41(2), 113-134. doi: <https://doi.org/10.1111/jpg.12696> ↑Ver página 53
- [Esteves *et al.*, 2018] Esteves, E., Esteves, V., Bungenstab, D., Araújo, O., y Morgado, C. (2018). Greenhouse gas emissions related to biodiesel from traditional soybean farming compared to integrated crop-livestock systems. *Journal of Cleaner Production*, 179(1), 81-92. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.262> ↑Ver página 53
- [Fan *et al.*, 2010] Fan, X., Chen, F., y Wang, X. (2010). Ultrasound-assisted synthesis of biodiesel from crude cottonseed oil using response surface methodology. *Journal of Oleo Science*, 59(5), 235-241. doi: <https://doi.org/10.5650/jos.59.235> ↑Ver página 65

- [Farías y Matos, 2009] Farías, A., y Matos, R. (2009). Influencia de la temperatura y tamaño de partícula en el proceso de extracción de aceite de semilla de uva (*Vitis vinífera*). *Revista de investigación universitaria*, 1(1), 31-37. Obtenido de <https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/riu/article/view/686> ↑Ver página 59
- [Flórez *et al.*, 2016] Flórez, D., Barco, J., y Rincón, S. (2016). Análisis comparativo de la carbonización de cuesco de palma de aceite en reactores de lecho fijo. *Tecnura*, 20(49), 45-58. doi: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a03> ↑Ver página 53
- [Fontalvo *et al.*, 2013] Fontalvo, M., Colucci, J., Velez, N., y Romañach, R. (2013). In-Line Near-Infrared (NIR) and Raman Spectroscopy Coupled with Principal Component Analysis (PCA) for in Situ Evaluation of the Transesterification Reaction. *Applied Spectroscopy*, 67(10), 1142-1149. doi: <https://doi.org/10.1366/12-06729> ↑Ver página 63
- [Gaurav *et al.*, 2017] Gaurav, N., Sivasankari, S., Kiran, G., Ninawe, A., y Selvin, J. (2017). Utilization of bioresources for sustainable biofuels: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 73(1), 205-214. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.070> ↑Ver página 53
- [González *et al.*, 2012] González, D., Benavides, Y., Londoño, J., Restrepo, M., y Cardona, B. (2012). Comparación del aceite de aguacate variedad Hass cultivado en Colombia, obtenido por fluidos supercríticos y métodos convencionales: una perspectiva desde la calidad. *Revista Lasallista de investigación*, 9(2), 151-161. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1794-44492012000200016 ↑Ver página 61
- [Granados y Valencia, 2018] Granados, W., y Valencia, J. (2018). *Cadena de palma de aceite Marzo 2018*. Ministerio de Agricultura. Bogotá: Ministerio de Agricultura. Obtenido de <https://www.scribd.com/document/399412396/002-Cifras-Sectoriales-2018-Marzo-Palma> ↑Ver página 53
- [Hernández *et al.*, 2007] Hernández, C., Mieres, A., Niño, Z., y Pérez, S. (2007). Efecto de la Refinación Física Sobre el Aceite de la Almendra del Corozo (*Acrocomia aculeata*). *Información tecnológica*, 18(5), 59-68. doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642007000500008> ↑Ver página 55
- [Jović, 2016] Jović, O. (2016). Durbin-Watson partial least-squares regression applied to MIR data on adulteration with edible oils of different origins. *Food Chemistry*, 213(1), 791-798. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.016> ↑Ver página 65
- [Kakati y Gogoi, 2016] Kakati, J., y Gogoi, T. (2016). Biodiesel production from Kutkura (*Meyna spinosa* Roxb. Ex.) Fruit seed oil: Its characterization and engine performance evaluation with 10% and 20% blends. *Energy Conversion and Management*, 121(1), 152-161. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.019> ↑Ver página 65

- [Kumar *et al.*, 2007] Kumar, A., Kumar, A., y Raheman, H. (2007). Biodiesel production from jatropha oil (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: An optimized process. *Biomass and Bioenergy*, 31(8), 569-575. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.03.003> ↑Ver página 65
- [Lamaisri *et al.*, 2015] Lamaisri, C., Punsuvon, V., Chanprame, S., Arunyanark, A., Srinives, P., y Liangsakul, P. (2015). Relationship between fatty acid composition and biodiesel quality for nine commercial palm oils. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 37(4), 389-395. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/281458345_Relationship_between_fatty_acid_composition_and_biodiesel_quality_for_nine_commercial_palm_oils ↑Ver página 61
- [Lee y Saka, 2010] Lee, J., y Saka, S. (2010). Biodiesel production by heterogeneous catalysts and supercritical technologies. *Bioresource Technology*, 101(19), 7191-7200. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.071> ↑Ver página 64
- [Liu *et al.*, 2018] Liu, S., Chen, W., Zhu, Z., Jiang, S., Ren, T., y Guo, H. (2018). A Review of the Developed New Model Biodiesels and Their Effects on Engine Combustion and Emissions. *Applied Sciences*, 8(11), 1-16. doi: <https://doi.org/10.3390/app8112303> ↑Ver página 53
- [Mahamuni y Adewuyi, 2009] Mahamuni, N., y Adewuyi, Y. (2009). Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Method To Monitor Soy Biodiesel and Soybean Oil in Transesterification Reactions, Petrodiesel-Biodiesel Blends, and Blend Adulteration with Soy Oil. *Energy Fuels*, 23(7), 3773-3782. doi: <https://doi.org/10.1021/ef900130m> ↑Ver página 67
- [Martínez, Arango, y Giraldo, 2019] Martínez, J., Arango, S., y Giraldo, D. (2019). The effects of bio-fuels on food security: A system dynamics approach for the Colombian case. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 34(1), 97-109. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.05.009> ↑Ver página 53
- [Mejía y Cuty, 2019] Mejía, A., y Cuty, E. (2019). Influencia del biodiésel de aceite de fritura usado, sobre las emisiones: índice de opacidad. *Tecnura*, 23(59), 60-67. doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.13722> ↑Ver página 53
- [Mendow y Querini, 2016] Mendow, G., y Querini, C. (2016). Argentina Patente n WO2016098025A1. Obtenido de <https://patents.google.com/patent/WO2016098025A1/un#patentCitations> ↑Ver página
- [Musa, 2016] Musa, I. (2016). The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using transesterification process. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1), 21-31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.06.007> ↑Ver página 65

- [Núñez, 2012] Núñez, D. (2012). Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta. *Tecnura*, 16(34), 142–156. doi: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.4.a10> ↑Ver página 53
- [Patle *et al.*, 2018] Patle, D. S., Sharma, S., Gadhamsetti, A. P., Balinge, K. R., Bhagat, P. R., Pandit, S., y Kumar, S. (2018). Ultrasonication-Assisted and Benzimidazolium-Based Brønsted Acid Ionic Liquid-Catalyzed Transesterification of Castor Oil. *ACS Omega*, 3(11), 15455-1546. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02021> ↑Ver página 54
- [Phan y Phan, 2008] Phan, A., y Phan, T. (2008). Biodiesel production from waste cooking oils. *Fuel*, 87(17-18), 3490-3496. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.07.008> ↑Ver página 61
- [Polo *et al.*, 2018] Polo, L., Fontalvo, M., y Mendoza, D. (2018). Producción de biodiesel mediante transesterificación enzimática de aceite extraído de residuos de la industria de alimentos. *Prospectiva*, 16(1), 26-33. doi: <https://doi.org/10.15665/rp.v16i1.1164> ↑Ver página 54, 60
- [Pratas *et al.*, 2011] Pratas, M., Freitas, S. D., Oliveira, M., Monteiro, S., Lima, A., y Coutinho, J. (2011). Biodiesel Density: Experimental Measurements and Prediction Models. *Energy Fuels*, 25(5), 2333-2340. doi: <https://doi.org/10.1021/ef2002124> ↑Ver página 65
- [Rassoulinejad-Mousavi *et al.*, 2018] Rassoulinejad-Mousavi, S., Mao, Y., y Zhang, Y. (2018). Reducing greenhouse gas emissions in Sandia methane-air flame by using a biofuel. *Renewable Energy*, 128(A), 313-323. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.079> ↑Ver página 53
- [Rivera *et al.*, 2014] Rivera, Y., Gutiérrez, C., Gómez, R., Matute, M., y Izaguirre, C. (2014). Cuantificación del deterioro de aceites vegetales usados en procesos de frituras en establecimientos ubicados en el Municipio Libertador del Estado Mérida. *Ciencia e ingeniería*, 35(3), 157-164. Obtenido de <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/cienciaeingenieria/article/view/5238/6753> ↑Ver página 61
- [Rojas, Flórez, y López, 2019] Rojas, A. F., Flórez, C., y López, D. (2019). Perspectivas de aprovechamiento de algunos residuos agro-industriales. *Revista Cubana de Química*, 31(1), 31-52. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212019000100031&lng=es&nrm=iso ↑Ver página 54
- [Romero *et al.*, 2016] Romero, L., Cruz, M., y Sierra, F. (2016). Efecto de la temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirólisis del cuesco de palma. *Tecnura*, 20(48), 89–99. doi:10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a06 ↑Ver página 53
- [Ruiz *et al.*, 2016] Ruiz, J., Sandoval, F., y Del Angel, J. (2016). Evaluación del efecto de cantidad de catalizador y relación metanol/aceite para la producción de biodiesel a

- partir del Cocos nucifera L. *Revista de Energía Química y Física*, 3(9), 46-55. Obtenido de http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Energia_Quimica_y_Fisica/vol3num9/Revista_de_Energia_Quimica_y_Fisica_V3_N9.pdf ↑Ver página 61
- [Sahasrabudhe *et al.*, 2017] Sahasrabudhe, S., Rodriguez, V., O'Meara, M., y Farkas, B. (2017). Density, viscosity, and surface tension of five vegetable oils at elevated temperatures: Measurement and modeling. *International Journal of Food Properties*, 20(S2), 1965-1981. doi: <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1360905> ↑Ver página 60
- [Sahoo y Das, 2009] Sahoo, P., y Das, L. (2009). Process optimization for biodiesel production from Jatropha, Karanja and Polanga oils. *Fuel*, 88(9), 1588-1594. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.02.016> ↑Ver página 65
- [Stavarache *et al.*, 2006] Stavarache, C., Vinatoru, M., y Maeda, Y. (2006). Ultrasonic versus silent methylation of vegetable oils. *Ultrasonics - Sonochemistry*, 13(5), 401-407. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2005.08.001> ↑Ver página 65
- [Stavarache *et al.*, 2003] Stavarache, C., Vinatoru, M., Nishimura, R., y Maeda, Y. (2003). Conversion of Vegetable Oil to Biodiesel Using Ultrasonic Irradiation. *Chemistry Letters*, 32(8), 716-717. doi: <https://doi.org/10.1002/chin.200350242> ↑Ver página 61
- [Sun *et al.*, 2018] Sun, M., Xu, X., Zhang, Q., Rui, X., Wu, J., y Dong, M. (2018). Ultrasonic-assisted Aqueous Extraction and Physicochemical Characterization of Oil from *Clanis bilineata*. *Journal of Oleo Science*, 67(2), 151-165. doi: <https://doi.org/10.5650/jos.ess17108> ↑Ver página 64
- [Tacias *et al.*, 2016] Tacias, V., Rosales, A., y Torrestiana, B. (2016). Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel: un caso de estudio. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(3), 303-313. doi: <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.03.05> ↑Ver página 60, 61
- [Teixeira *et al.*, 2018] Teixeira, G., Ávila, S., Silveira, J., Ribani, M., y Ribani, R. (2018). Chemical, thermal and rheological properties and stability of sapucaia (*Lecythis pisonis*) nut oils. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(3), 2105-2121. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6742-1> ↑Ver página 53
- [Thapa, Indrawan, y Bhoi, 2018] Thapa, S., Indrawan, N., y Bhoi, P. (2018). An overview on fuel properties and prospects of Jatropha biodiesel as fuel for engines. *Environmental Technology & Innovation*, 9(1), 210-219. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.12.003> ↑Ver página 53
- [Topare *et al.*, 2019] Topare, N., Patil, K., Naik, P., Sonawane, A., y Joshi, P. (2019). Application Ultrasound for Synthesis of Biodiesel. *Emerging Trends in Chemical Engineering*, 2(1), 1-8. Obteni-

do de https://www.researchgate.net/publication/272686765_Application_of_Ultrasound_for_Synthesis_of_Biodiesel ↑Ver página 63

[Torres *et al.*, 2017] Torres, L., Ben-Youseff, C., Alcocer, L., y De la rosa, D. (2017). Efecto de la temperatura y del tiempo de reacción sobre la esterificación y la transesterificación de aceites comestibles usados. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*, 4(13), 19-35. Obtenido de http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Ciencias_Naturales_y_Agropecuarias/vol4num13/Revista_de_Ciencias_Naturales_y_Agropecuarias_V4_N13_3.pdf ↑Ver página 63

[Toscano y Maldini, 2007] Toscano, G., y Maldini, E. (2007). Analysis of the physical and chemical characteristics of vegetable oils as fuel. *Journal of Agricultural Engineering*, 38(3), 39-47. doi: <https://doi.org/10.4081/jae.2007.3.39> ↑Ver página 61

[Veljković *et al.*, 2012] Veljković, V., Avramović, J., y Stamenković, O. (2012). Biodiesel production by ultrasound-assisted transesterification: State of the art and the perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1193-1209. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.022> ↑Ver página 54, 63

[Yu *et al.*, 2017] Yu, G., Nie, J., Lu, L., Wang, S., Li, Z., y Lee, M. (2017). Transesterification of soybean oil by using the synergistic microwave-ultrasonic irradiation. *Ultrasonics - Sonochemistry*, 39(1), 281-290. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.04.036> ↑Ver página 53



Modelo de programación entera mixta en la planeación de actividades y personal en un capítulo académico estudiantil

Mixed Integer Programming Model for Activities and Personal Planning on Student Academic Chapter

Jair Eduardo Rocha González ¹, Hernando Alexander Gutiérrez Sánchez ², Cindy Lorena Silva Riapira ³,

Fecha de Recepción: 07 de diciembre de 2020

Fecha de Aceptación: 01 de Abril de 2021

Cómo citar: Rocha-González., J.E. Gutiérrez-Sánchez., H.A. y Silva-Riapira., C.L. (2021). Modelo de programación entera mixta en la planeación de actividades y personal en un capítulo académico estudiantil. *Tecnura*, 25(69), 76-100. <https://doi.org/10.14483/22487638.15672>

Abstract

Context: Currently it is possible to find in various academic programs in engineering around the world multiple student groups as is the case of the Institute of Industrial & System Engineers (IISE), whose purpose is to promote the training and integration of its members with the industry and the work environment through the implementation of activities of different type and nature in a self-managed way but empirically and with little use of the few references in the literature on the subject.

Method: Therefore, this article presents a mixed integer programming model that identifies the parameters of capacity, repetitiveness, retribution and temporality compiled from the evaluation norms of the student chapters of the IISE, with which it was possible to formulate a mathematical model with the objective of maximizing the score by optimizing the use of the human talent of the student group, taking into account the restrictions in terms of quantity and repetition of each type of activity to be performed.

Results: It was possible to obtain a staff planning and scheduling model for an annual performance horizon of a student group, with which it is possible to establish a work strategy in flexible teams in number and purpose to perform the activities with the highest score before the IISE organization that evaluates results.

Conclusions: The proposed model manages to establish an optimization method for the selection of critical activities to be performed during a year by a student chapter with a rational use of human talent with differentiation of work committees, types of dedication and differentiation of tasks to ensure flexibility in the allocation of members and the size in the number of members associated with the student chapter.

Keywords: mixed integer programming, chapter student, scheduling activities, assignation personal.

¹Ingeniero industrial, magíster en Ingeniería Industrial, docente planta, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial. Bogotá D. C., Colombia. Email: jerochag@unal.edu.co

²Ingeniero industrial, magíster en Ingeniería Industrial, docente medio tiempo, Unidades Tecnológicas de Santander, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería. Programa Ingeniería Industrial, Bucaramanga Santander. Colombia. Email: ha-lexandergutierrez@correo.uts.edu.co

³Ingeniera industrial, magíster en Ingeniería Industrial, investigadora, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial. Bogotá D. C., Colombia. Email: cisilva@unal.edu.co

Resumen

Contexto: En la actualidad es posible encontrar en diversos programas académicos en ingeniería alrededor del mundo múltiples grupos estudiantiles, como es el caso del Institute of Industrial & System Engineers (IISE), cuyo propósito es promover la formación e integración de sus miembros con la industria y el ambiente laboral, mediante la ejecución de actividades de diferente tipo y naturaleza de forma autogestionada pero empírica y con poca utilización de las escasas referencias en la literatura acerca del tema.

Método: Este artículo presenta un modelo de programación entera mixta que identificó los parámetros de capacidad, repetitividad, retribución y temporalidad recopilados de las normas de evaluación de los capítulos estudiantiles del IISE, con los cuales fue posible formular un modelo matemático con el objetivo de maximizar el puntaje optimizando el uso del talento humano del grupo estudiantil, teniendo en cuenta las restricciones en cuanto a cantidad y repetición de cada tipo de actividad a realizar.

Resultados: Se obtuvo un modelo de planeación y programación de personal para un horizonte anual de desempeño de un grupo estudiantil, con el cual es posible establecer una estrategia de trabajo en equipos flexibles en número y propósito para realizar las actividades con mayor puntuación ante el organismo IISE evaluador de resultados.

Conclusiones: El modelo propuesto logra establecer un método de optimización para la selección de las actividades críticas a realizar durante un año por un capítulo estudiantil, con un uso racional del talento humano con diferenciación de comités de trabajo, tipos de dedicación y de tareas, para garantizar la flexibilidad en la asignación de miembros y el tamaño en el número de sus asociados al capítulo estudiantil.

Palabras clave: programación entera mixta, capítulo estudiantil, programación de actividades, asignación de personal.

Tabla de Contenidos

	Página
Introducción	78
Estado del arte	79
Planeación de capacidad (capacity planning)	79
Metodología	80
Caracterización de las condiciones y características del sistema a modelar	81
Caracterización del estado actual del capítulo estudiantil	81
Caracterización de las condiciones de evaluación por la asociación profesional	82
Formulación de un modelo de programación entera mixta para la planeación y programación de actividades	83
Estimación de los parámetros de consumo y disponibilidad de recursos por tipo de actividad	83
Establecimiento de las restricciones de recursos y condiciones de operación	83
Formulación del modelo MIP en términos de requerimientos y disponibilidades	87
Resultados	92

Conclusiones 97

Referencias 97

Introducción

Ante algunos señalamientos en los últimos años de formación de competencias en aprendizaje activo y cumplimiento de objetivos en estudiantes de diversas áreas de conocimiento con la conformación de grupos académicos ([American Nurses Association, 2015](#), [González Martín y Génova Fuster, 2008](#), [Viles et al., 2012](#)), es necesario implementar métodos que permitan la planeación y programación de las actividades por realizar en estos grupos académicos para el logro de sus metas académicas, deportivas o sociales. Esto, debido a que al revisar este aspecto en dos grupos de investigación, tres semilleros de investigación y dos capítulos estudiantiles en dos reconocidas instituciones de educación superior (IES) en Colombia, no se cuenta con técnicas de planeación para la selección y programación de actividades, sino que estas se realizan de manera empírica y cubriendo los requerimientos en un corto plazo; es decir, cubriendo las necesidades de planeación en una actividad propuesta con anticipación de máximo de un mes, sin criterios de optimización de recursos.

Por tanto, la elección de un modelo de programación entera mixta coincide con la idea de realizar una programación de tareas o actividades en diferentes periodos del horizonte de planeación para la que es necesaria la asignación de diferentes tipos de recursos ([Pinedo, 1995](#)) propia de algunos sistemas de producción ([Sánchez-Gómez, 2017](#), [Johnson y Montgomery, 1974](#)) y educativos ([Niño-Villamizar y Román-Castillo, 2016](#)). Esto, con el fin de obtener una programación de actividades para cada mes de un año de planeación de actividades como las requeridas para el ente evaluador de este caso IISE y teniendo como elemento primario la asignación óptima de recursos ([Institute of Industrial & Systems Engineers, 2017](#)).

Se espera que el capítulo estudiantil logre los objetivos particulares en instancias académicas, deportivas o sociales ([Ander-Egg, 2001](#)), con la cual se pretende la proyección y participación en comunidades académicas de carácter profesional a nivel internacional, elemento que contribuye a la integración social y cultural de los grupos de estudiantes de diferentes nacionalidades ([Prieto et al., 2014](#)) de una manera ordenada y con criterios claros de eficiencia.

Ahora bien, en el campo de la ingeniería, estos grupos bajo la modalidad de capítulos estudiantiles son avalados por múltiples asociaciones y sociedades con diferentes líneas de especialización en ingenierías Mecánica, Química, Eléctrica, Electrónica, de Sistemas e Industrial ([American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2017](#), [American Institute of Chemical Engineers, 2017](#), [Institute of Industrial & Systems Engineers, 2017](#), [IISE, 2017](#)).

De esta manera, un método de planeación y programación permite una vinculación a estas sociedades y asociaciones profesionales por los capítulos estudiantiles, con un plan adecuado para la planeación y administración, programación de reuniones, alcances en el medio, comunicación, selec-

ción, reclutamiento y rotación de personal; así como participación y relacionamiento con la asociación o sociedad (IISE, 2017). Con estos será más sencillo realizar un proceso de trazabilidad que incluya la elaboración de un informe de evidencias con el detalle de las tareas y actividades adelantadas.

Finalmente, este informe del plan permitirá obtener los tres elementos por parte de la asociación o sociedad que avala: una evaluación numérica de desempeño por logros obtenidos con cada actividad; una ponderación, clasificación y comparación con otros grupos estudiantiles; así como la renovación y permanencia del grupo como asociado, con los incentivos ofertados por las asociaciones convocantes de estos grupos estudiantiles.

Por tanto este artículo pretende dar solución a las inquietudes de muchos de estos grupos estudiantiles acerca de la cantidad de recursos y miembros a emplear y asignar, en medio de las tareas emprendidas, y sus consecuencias en la organización del grupo estudiantil, tales como cuál será la mejor forma de organizar el equipo de trabajo, la dedicación horaria de cada participante en el grupo, entre otras para el caso en estudio del IISE, y su sistema de evaluación fundamentada en el informe *University Chapter Activity Report (UCAR)*.

Estado del arte

Al realizar un análisis de correspondencia entre los requerimientos de planeación y programación de actividades para un año de desempeño por un grupo estudiantil perteneciente a un programa académico de Ingeniería Industrial en una institución de educación superior (IES) en Colombia, con la literatura disponible en problemas de programación de actividades, fue posible establecer la influencia en materia de antecedentes y fundamentos de los problemas de planeación de capacidad (*capacity planning*).

Planeación de capacidad (capacity planning)

Este tipo de problema considera, en una perspectiva de productividad, la capacidad como la cantidad de servicios y productos elaborados por una unidad productiva para satisfacer la demanda de la sociedad en un lapso definido (Domínguez, 1994, Kalenatic, 2001). Ante esta perspectiva, la medición de capacidad se hace a través del cálculo de la cantidad de tiempo disponible o utilizable de uno o más recursos necesarios en la fabricación de piezas o en prestación de servicios, con los cuales es posible derivar el número de unidades a fabricar o servicios a realizar, mediante la comparación entre las capacidades disponibles y requeridas en cada elemento de un sistema productivo (Kalenatic, 2001, Todorovic, 1995, Zelenovic, 1987).

En otro contexto, una segunda perspectiva –orientada a considerar la capacidad como estrategia dinámica– concibe la planeación de la capacidad como un sistema conformado por diferentes elementos que son limitados por la disponibilidad y uso de los recursos en lapsos definidos en favor del logro de objetivos y metas organizacionales, en un ámbito de competencia en las cadenas de

suministro (Aarabi y Hasanian, 2014).

Los autores incorporan este aspecto en el desarrollo del modelo de programación entera mixta propuesto, al contener los elementos descritos en la literatura referentes a elementos, como el pronóstico de la demanda, la estimación de las tasas de producción, el cálculo de la capacidad requerida para el programa de actividades, teniendo en cuenta las limitaciones de capacidad y condiciones especiales del grupo estudiantil (Aarabi y Hasanian, 2014).

Adicionalmente, este enfoque seleccionado presenta casos con similitud a la solución requerida por el grupo estudiantil respecto a la programación de actividades, como las llevadas a cabo en la planeación en un laboratorio de una universidad (Bicova y Fulemova, 2014); programación de cirugías; asignación de personal médico y planeación de volumen de pacientes a servir en hospitales (Giorgiadis y Athanasion, 2013, Guoxuan y Demeulemeester, 2013); planeación de capacidad para el sistema de gestión de residuos sólidos en una población (Li *et al.*, 2012); planeación de fuerza de trabajo para demanda con incertidumbre y niveles de inventarios con uno o varios productos y múltiples periodos de tiempo (Huang, *et al.*, 2009, Ramezani *et al.*, 2012).

En una revisión de tipos de modelos empleados para la representación de este tipo de problemas, se encontraron 58 estudios, de los cuales 34 son formulados como un modelo de programación entera mixta, llegando a un 60 % de uso de esta técnica, por lo cual los autores se inclinan por este tipo de modelo (Martinez-Costa *et al.*, 2014).

De forma similar, los procedimientos de solución abarcan un enfoque de proyectos y programación de actividades (Bicova y Fulemova, 2014), programación matemática y simulación (Giorgiadis y Athanasion, 2013, Guoxuan y Demeulemeester, 2013), programación dinámica (Li *et al.*, 2012), reglas de asignación (Huang, *et al.*, 2009) y metaheurísticas (Ramezani *et al.*, 2012). De estas, los autores siguen una técnica con procedimientos algorítmicos con *software* especializado usado en 14 de los 58 estudios señalados, siendo el método más utilizado por encima de heurísticas, metaheurísticas y otras técnicas (Martinez-Costa *et al.*, 2014).

Metodología

La metodología seguida para el desarrollo del modelo de planeación y programación de actividades con una técnica de programación entera mixta (MIP, por su sigla en inglés) en el capítulo estudiantil siguió tres fases que se describen en la figura 1. Estas siguen el proceso descrito en la literatura para el tratamiento de un problema con técnicas de programación matemática (Johnson y Montgomery, 1974, Taha, 2012), así como algunas de las fases propuestas para la investigación en ciencia y tecnología (Gallego-Torres *et al.*, 2020).

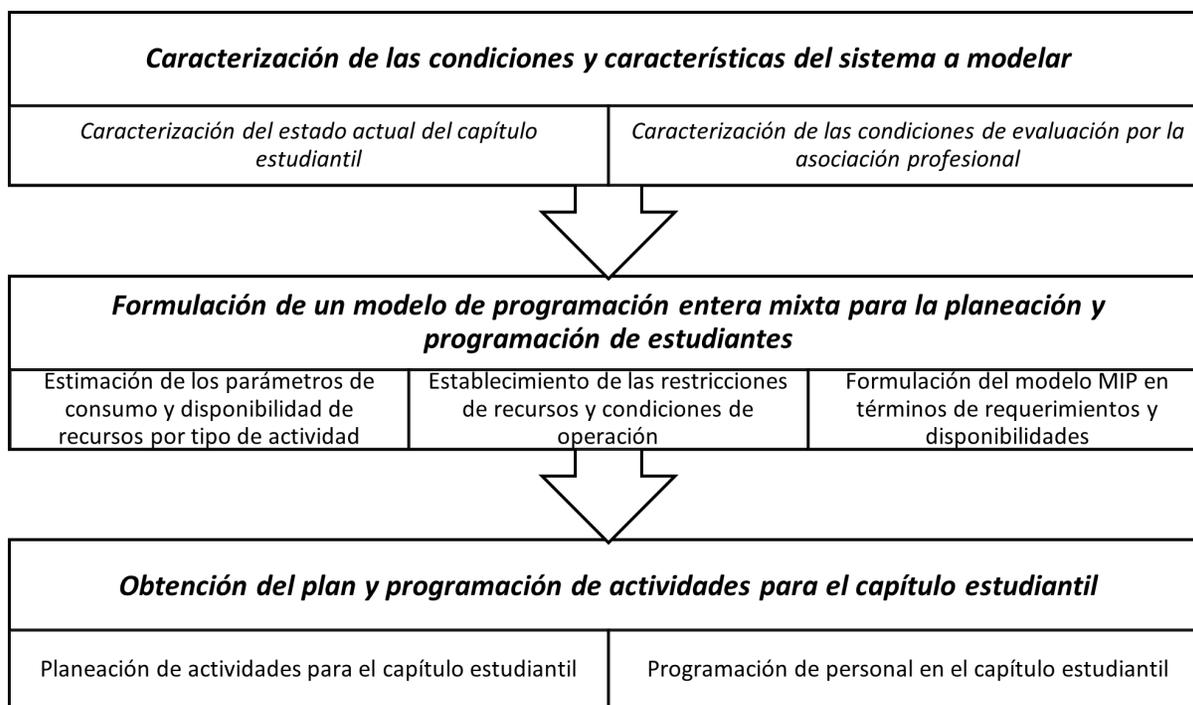


Figura 1. Metodología seguida durante el estudio

Fuente: elaboración propia.

Caracterización de las condiciones y características del sistema a modelar

En este aparte se reconocen las características del capítulo estudiantil como objeto de juzgamiento y de la evaluación del IISE, como escala de evaluación con condiciones y características particulares que son relevantes en la inclusión en el modelo.

Caracterización del estado actual del capítulo estudiantil

En esta etapa del proceso realizado en la investigación fue posible determinar la forma de organización, conformación y su relacionamiento interno y externo que determina su forma de actuar y, por ende, las actividades a realizar, de acuerdo con su acta de constitución y estatutos declarados en su fundación (IISE, 2017).

De esta manera, el capítulo estudiantil en el cual se realiza el estudio presenta una organización formal de cinco comités o equipos de trabajo de acuerdo con los fines operacionales identificados como clave para dar cumplimiento y generar la evidencia necesaria para cumplir los requerimientos del IISE. Estas áreas han adoptado denominaciones y tareas de publicidad [Pub], académico [Aca], finanzas y contabilidad [Fin], operaciones [Ope] y dirección [Dir]. Es de notar que cada integrante

tiene diferentes formas de vinculación en dedicación horaria

Posterior al reconocimiento de la forma de organización del capítulo estudiantil se realizó la caracterización del proceso de planeación actual, el cual consistió en la elaboración de una lista de tareas posibles a realizar durante un año de gestión, estipuladas en el *UCAR*, las cuales se seleccionan según criterios subjetivos, como la preferencia, disponibilidad y expectativas por resultados de los miembros para realizar una u otra tarea de las fijadas inicialmente por el comité de dirección.

Luego, se procede con la estimación de unos tiempos necesarios para la planeación y ejecución de cada actividad requerida por cada comité de trabajo, así como el número máximo de actividades de cada tipo que pueden realizarse durante un periodo de operación, según las reglas de evaluación estipuladas por el *UCAR*.

Como resultado de este proceso es posible observar en conjunto con los integrantes que existen múltiples actividades que se ejecutan de forma lenta y poco coordinada entre los miembros de cada equipo de trabajo, ya que varios equipos pueden programar y realizar tareas para varias actividades durante una misma temporada. Esta condición implica competencia por la capacidad de los equipos de diferentes actividades, mientras en otras épocas se tienen periodos de inactividad del capítulo estudiantil, situación que implica pérdida de visibilidad y posicionamiento del grupo en el imaginario de la comunidad académica a la que pertenece.

Por tanto, este proceso ha mostrado un desgaste innecesario de recursos humanos y materiales requeridos para la realización de cada tarea, al concentrar un gran número de tareas en unas pocas temporadas, en vez de distribuirlas de manera uniforme a través del horizonte de planeación. Esto implica sobrecarga de tareas y asignación de horas para unos cuantos miembros que pertenecen a determinados grupos de trabajo, mientras otros muestran subutilización en otras temporadas.

Caracterización de las condiciones de evaluación por la asociación profesional

El IISE realiza un escalafón anual con todos los capítulos estudiantiles asociados por regiones geográficas en los cuales se evalúa en cada capítulo estudiantil la realización de actividades como la planeación y administración; la programación y ejecución de reuniones y comunicaciones con miembros internos y externos; selección y reclutamiento de miembros; eventos académicos y sociales con otros capítulos estudiantiles o profesionales; visitas industriales; asesorías; participación en proyectos y difusión de temáticas de ingeniería industrial en empresas, escuelas y organizaciones sociales; entre otras actividades (IISE, 2017).

Es de notar que estas actividades pertenecen a una clasificación genérica amplia y no definida de manera formal en tareas fijas y exactas, lo que permite a cada capítulo estudiantil confeccionar un abanico de tareas según el perfil académico, aptitudes y capacidades de sus miembros. Estas darán evidencia sobre la realización de actividades en cada uno de los aspectos de clasificación estipulados por el (IISE, 2017).

En cuanto a la evaluación que realiza el IISE de las actividades, existe una ponderación de cada

actividad a través del documento de evaluación *UCAR*, que está disponible en la página web de esta asociación evaluadora. De igual forma, existe una restricción respecto al número mínimo y máximo para realizar cada tipo de actividad.

Formulación de un modelo de programación entera mixta para la planeación y programación de actividades

En este aspecto se realizaron tres actividades que contribuían a la formación de la estructura del modelo de programación entera mixta (*mixer integer programming*, MIP) en términos de requerimientos y disponibilidades, incluyendo las condiciones especiales que no son cuantificables en el consumo de recursos.

Estimación de los parámetros de consumo y disponibilidad de recursos por tipo de actividad

En la realización del modelo matemático se consideraron 47 actividades que abarcan tareas administrativas, reuniones de miembros, visitas con destino a industrias y a otras instituciones de educación, participación y relacionamiento en eventos académicos y con otros capítulos, labores de selección y reclutamiento de miembros, entre otras tareas, tal como se describen en el *UCAR*, y se detallan en la tabla 1 (IISE, 2017).

La estimación de parámetros de consumo se realiza a partir de registros históricos de los últimos tres años de actividad del capítulo estudiantil; de esta forma se logra la estimación promedio de los tiempos de planeación y ejecución para las actividades disponibles por realizar.

En cuanto a la disponibilidad horaria, esta se calculó de acuerdo con las normas del capítulo en la cual se ha establecido con intensidades de 16, 8 y 4 horas por mes por cada integrante, los cuales se denominan con alta, media y baja dedicación respectivamente. En otro aspecto, la cantidad de integrantes por cada tipo de dedicación es de 4, 3 y 5 integrantes, luego de la convocatoria con dedicación alta, media y baja en el mismo orden y considerando como cero integrantes al inicio del horizonte de planeación.

Establecimiento de las restricciones de recursos y condiciones de operación

En este aspecto, la ponderación o puntaje, y el número mínimo y máximo de actividades para cada tipo de actividad se presentan en la tabla 2, donde es posible notar que existen tres condiciones diferenciales: la primera trata de la obligatoriedad para la realización de las reuniones del capítulo estudiantil; la segunda es sobre las fechas de obligatorio cumplimiento para la entrega de la planeación e informes respecto a este proceso, y la tercera consiste en los puntajes a asignar por un conjunto de actividades que, aunque no tienen tope máximo en el número de veces a realizar, sí poseen tope en la ponderación a obtener en combinación con otras actividades similares.

Tabla 1. Codificación de actividades

N.º	Actividad	N.º	Actividad
1	Informe de líderes	25	Cartas/ <i>mails</i> /volantes para carreras de Ingeniería indicadas
2	UCAR	26	Mesa/ <i>stand</i> en la feria/evento de actividades estudiantiles
3	Informe planeación estratégica	27	Direccionamiento de membresía
4	Reuniones <i>officers</i>	28	Envío de carta/ <i>mail</i> a otras disciplinas de ingeniería
5	Reuniones generales miembros	29	Reunión de membresía de transición celebrada
6	Visitas a plantas	30	Hoja de trabajo de reclutamiento de membresía de transición completada
7	Ponencias en eventos	31	Participación en competición video IISE Industry Advisory Board
8	Participación evento profesional	32	Participación de artículos a competencia patrocinadas por IISE
9	Participación semana ingeniería	33	Participación en competencia de diseño e innovación
10	Organización conferencias	34	Participación de equipo en competencia de simulación
11	Eventos sociales	35	Organizar actividades o sesiones estudiantiles en la conferencia anual de IISE
12	Tutorías/Mentorías	36	Asistir a la conferencia anual de IISE
13	Visitas a colegios	37	Asistir a Volunteer Leadership Training en la conferencia anual de IISE
14	Consejería de carrera	38	Seguimiento de redes sociales con redes del capítulo de la organización nacional
15	Invitación de miembros profesionales	39	Otras actividades de participación como webcast, webinars, etc.
16	Proyectos comunitarios	40	Envío de delegados oficiales a la conferencia regional
17	Lista de distribución	41	Participación en competencia de artículos técnicos a nivel regional
18	Uso de redes sociales para contacto/distribución de capítulos	42	Ser universidad sede de la conferencia regional
19	Sitio web capítulo	43	Visitar otros capítulos fuera actividades de conferencia
20	Uso de redes sociales para contacto/distribución de capítulos	44	Realizar actividades conjuntas con otros capítulos fuera de actividades de conferencia
21	Envío de comunicaciones a áreas de miembros profesional	45	Tener representante en el capítulo profesional IISE
22	Publicar las noticias del capítulo en el periódico de la universidad y/o boletín	46	Enviar artículos de interés periodístico al equipo de liderazgo regional de IISE
23	Otras actividades de comunicación	47	Seguimiento de redes sociales con redes del capítulo de la organización regional
24	Cartas/ <i>mails</i> /volantes para nuevos miembros		

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, el modelo también contempla una baja concentración de actividades a realizar en los meses de junio, julio, diciembre y enero, los cuales en Colombia coinciden con la época de vacaciones estudiantiles, para las que tan solo se programa la realización de una única actividad de cualquier tipo.

Tabla 2. Estimación de parámetros de tiempo, puntaje y número de actividades en el modelo matemático de programación de actividades y asignación de personal

	Mínimo de actividades [Actividad]	Máximo de actividades [Actividad]	Puntaje por actividad [Puntaje/Actividad]	Mínimo puntaje [Puntaje/Actividad]	Máximo puntaje [Puntaje/Actividad]	Máximo número de actividades [Actividades/Año]	Condición 1	Condición 2 fechas de elaboración	Condición 3 puntaje por grupos de actividades	Tiempo requerido de planeación y operación [Horas/Actividad]				
										Pub	Aca	Fin	Ope	Dir
1	1	Sin límite	7,5	0	7,5	1	Obligatorio		Máx. puntaje 15	0	0	0	0	2
2	1	1	7,5	0	7,5	1	Obligatorio	abr-30		1	1	1	1	4
3	0	1	5	0	5	1		oct-31		5	5	5	5	5
4	0	Sin límite	1	0	5	5			Máx. puntaje 5	1	1	1	1	4
5	0	Sin límite	1	0	5	5				2	2	2	2	2
6	0	Sin límite	2	0	8	4			Máx. puntaje 17	2	2	4	6	1
7	0	Sin límite	2	0	8	4				0	8	4	0	0
8	0	Sin límite	2	0	6	3				0	0	4	0	2
9	0	1	2	0	2	1				0	0	0	4	1
10	0	Sin límite	2	0	2	1				8	4	4	8	2
11	0	Sin límite	1	0	3	3			2	0	4	10	2	
12	0	Sin límite	3	0	3	1			Máx. puntaje 8	2	10	2	2	2
13	0	Sin límite	1	0	1	1				0	6	2	4	1
14	0	Sin límite	3	0	3	1				2	6	0	2	1
15	0	Sin límite	2	0	2	1				2	0	1	1	1
16	0	Sin límite	1	0	1	1			2	0	4	10	2	
17	0	Sin límite	1	0	5	5			Máx. puntaje 5	4	0	0	0	1
18	0	Sin límite	1	0	5	5				2	0	0	0	1
19	0	Sin límite	1	0	5	5				4	0	0	0	2

Tabla 2. Estimación de parámetros de tiempo, puntaje y número de actividades en el modelo matemático de programación de actividades y asignación de personal

	Mínimo de actividades [Actividad]	Máximo de actividades [Actividad]	Puntaje por actividad [Puntaje/Actividad]	Mínimo puntaje [Puntaje/Actividad]	Máximo puntaje [Puntaje/Actividad]	Máximo número de actividades [Actividades/Año]	Condición 1	Condición 2 fechas de elaboración	Condición 3 puntaje por grupos de actividades	Tiempo requerido de planeación y operación [Horas/Actividad]				
										Pub	Aca	Fin	Ope	Dir
20	0	Sin límite	1	0	5	5				6	0	0	0	2
21	0	Sin límite	1	0	5	5				2	0	1	1	1
22	0	Sin límite	1	0	5	5				10	0	0	0	2
23	0	Sin límite	1	0	5	5				4	0	0	0	2
24	0	Sin límite	2	0	2	1			Máx. puntaje 10	5	4	2	6	1
25	0	Sin límite	4	0	4	1				4	0	1	4	1
26	0	Sin límite	4	0	4	1				10	0	4	24	1
27	0	Sin límite	4	0	4	1				0	0	5	0	5
28	0	Sin límite	2	0	2	1				0	0	0	2	1
29	0	Sin límite	5	0	5	1			Máx. puntaje 15	1	1	1	1	1
30	0	Sin límite	10	0	10	1				2	2	2	2	2
31	0	Sin límite	2	0	2	1			Máx. puntaje 10	5	0	0	6	1
32	0	Sin límite	2	0	2	1				0	20	2	0	2
33	0	Sin límite	2	0	2	1				10	20	2	0	2
34	0	Sin límite	2	0	2	1				0	20	2	6	2
35	0	Sin límite	6	0	6	1				10	10	2	20	3
36	0	Sin límite	2	0	2	1				0	0	0	0	2
37	0	Sin límite	2	0	2	1				0	0	0	0	2
38	0	Sin límite	2	0	2	1				10	0	0	0	2
39	0	Sin límite	2	0	4	2	Máximo 2		0	10	2	10	0	
40	0	Sin límite	2	0	2	1			0	0	2	2	2	

Máx. puntaje 10

Tabla 2. Estimación de parámetros de tiempo, puntaje y número de actividades en el modelo matemático de programación de actividades y asignación de personal

	Mínimo de actividades [Actividad]	Máximo de actividades [Actividad]	Puntaje por actividad [Puntaje/Actividad]	Mínimo puntaje [Puntaje/Actividad]	Máximo puntaje [Puntaje/Actividad]	Máximo número de actividades [Actividades/Año]	Condición 1	Condición 2 fechas de elaboración	Condición 3 puntaje por grupos de actividades	Tiempo requerido de planeación y operación [Horas/Actividad]				
										Pub	Aca	Fin	Ope	Dir
41	0	Sin límite	2	0	2	1				0	40	0	10	3
42	0	Sin límite	6	0	6	1				10 00	10 00	10 00	10 00	10 00
43	0	Sin límite	2	0	2	1				0	5	2	5	5
44	0	Sin límite	2	0	2	1				5	5	5	5	5
45	0	Sin límite	2	0	2	1				0	2	0	0	2
46	0	Sin límite	2	0	2	1				10	20	0	6	2
47	0	Sin límite	2	0	2	1				10	0	0	0	2

Fuente: elaboración propia.

Formulación del modelo MIP en términos de requerimientos y disponibilidades

El modelo matemático propuesto incluye una función objetivo que pretende maximizar el nivel de reconocimiento del capítulo estudiantil por su organización evaluadora, considerando para ello restricciones de capacidad de recursos disponibles, puntajes deseados y asignación de personal a grupos de trabajo. Así, es posible hallar el número, tipo y periodo a realizar cada actividad propuesta de manera racional y bajo un criterio de optimización, tal como se presentan en las ecuaciones (1) a (25):

$$Max F = \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T P_i X_{it} \quad (1)$$

S.A:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T P_i X_{it} \leq Pmax \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T P_i X_{it} \geq Pmin \quad (3)$$

$$\sum_{t=1}^T = 1 \quad ; \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^T X_{it} \leq N \text{Max}_i \quad ; \quad i = 3, 4, 5, \dots, m \quad (5)$$

$$\sum_{t=1}^T X_{it} \leq NT \text{Max}_i \quad ; \quad \forall t, t = 1, 2, 3, \dots, T \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T P_i X_{it} = G1 \text{max} \quad ; \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^T P_i X_{it} \leq G2 \text{max} \quad ; \quad i = 3 \quad (8)$$

$$\sum_{t=1}^T P_i X_{it} \leq G3 \text{max} \quad ; \quad i = 4, 5 \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^T P_i X_{it} \leq G4 \text{max} \quad ; \quad i = 6, 7, 8, \dots, 11 \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^T P_i X_{it} \leq G5 \text{max} \quad ; \quad i = 12, 13, 14, \dots, 16 \quad (11)$$

$$\sum_{t=1}^T P_i X_{it} \leq G6 \text{max} \quad ; \quad i = 17, 18, 19, \dots, 23 \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^T P_i X_{it} \leq G7 \text{max} \quad ; \quad i = 24, 25, 26, \dots, 28 \quad (13)$$

$$\sum_{t=1}^T P_i X_{it} \leq G8 \text{max} \quad ; \quad i = 29, 30 \quad (14)$$

$$\sum_{t=1}^T P_i X_{it} \leq G9 \text{max} \quad ; \quad i = 31, 32, 33, \dots, 39 \quad (15)$$

$$\sum_{t=1}^T P_i X_{it} \leq G10 \text{max} \quad ; \quad i = 40, 41, 42, \dots, 47 \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^m Treq_{ij} X_{it} \leq \sum_{k=1}^k Dh_{jk} \cdot W_{jkt} \forall j, t \quad (17)$$

$$W_{jkt-1} + H_{jkt} - L_{jkt} = W_{jkt} \quad \forall j, k, t \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^n W_{jkt} \leq WMax_k \quad \forall k, t \quad (19)$$

$$X_{it} = 1 \quad ; \quad i = 1 \wedge t = Feb, Mar, Abr \quad (20)$$

$$X_{it} = 1 \quad ; \quad i = 3 \wedge t = Ago, Sep, Oct \quad (21)$$

$$X_{it} = 1 \quad ; \quad i = 5 \wedge t = May, Jun, \dots, Oct \quad (22)$$

$$X_{it} = 1 \quad ; \quad i = 5 \wedge t = Nov, Dic, \dots, Abr \quad (23)$$

$$W_{jkt}, H_{jkt}, L_{jkt} \geq 0 \wedge \mathcal{Z} \quad (24)$$

$$X_{it} \in (0, 1) \wedge \mathcal{Z} \quad (25)$$

Objetivo: determinar la realización de la actividad tipo i , durante el periodo t con el propósito de maximizar el puntaje otorgado por IISE al capítulo estudiantil.

Función objetivo: el objetivo del modelo consiste en una función de maximización de puntaje a obtener por parte de la evaluación del IISE: $f(X_{it})$.

Variables de decisión:

X_{it} : Decisión de realizar la actividad tipo i durante el mes de ejecución de actividades t ; $i = 1, 2, 3, \dots, m$; $t = may., jun., jul., ago., sep., oct., nov., dic., ene., feb., mar., abr.$ W_{jkt} : número de personas pertenecientes a la dedicación horaria tipo k en el grupo de trabajo j durante el mes de gestión tipo t ; $j = 1, 2, 3, \dots, n$; $k = 1, 2, 3, \dots, p$; $t = may., jun., \dots, T$.

H_{jkt} : número de personas a vincular como nuevos a la dedicación horaria tipo k en el grupo de trabajo j durante el mes de ejecución de actividades t ; $j = 1, 2, 3, \dots, n$; $k = 1, 2, 3, \dots, p$; $t = may., jun., \dots, T$.

L_{jkt} : número de personas a desvincular en la dedicación horaria tipo k en el grupo de trabajo j durante el mes de ejecución de actividades t ; $j = 1, 2, 3, \dots, n$; $k = 1, 2, 3, \dots, p$; $t = may., jun., \dots, T$.

Parámetros:

P_i : puntaje que otorga el IISE por realizar una actividad tipo i en la evaluación de desempeño de capítulos estudiantiles.

PM_{ax} : puntaje máximo deseado por el capítulo estudiantil en la evaluación de desempeño otorgada por el IISE.

PM_{in} : puntaje mínimo deseado por el capítulo estudiantil en la evaluación de desempeño otorgada por el IISE.

$NMax_i$: cantidad máxima de actividades tipo i a realizarse durante el horizonte de planeación.

$NTMax_{it}$: cantidad máxima de actividades tipo i a realizar durante el mes t .

$G1Max$: puntaje máximo a obtener por realizar las actividades tipo i perteneciente al grupo de evaluación planeación y administración.

$G2Max$: puntaje máximo a obtener por realizar las actividades tipo i perteneciente al grupo de evaluación planeación estratégica.

$G3Max$: puntaje máximo a obtener por realizar las actividades tipo i perteneciente al grupo de evaluación programación del capítulo estudiantil.

$G4Max$: puntaje máximo a obtener por realizar las actividades tipo i perteneciente al grupo de evaluación actividades del capítulo estudiantil.

$G5Max$: puntaje máximo a obtener por realizar las actividades tipo i perteneciente al grupo de evaluación relacionamiento del capítulo estudiantil.

$G6Max$: puntaje máximo a obtener por realizar las actividades tipo i perteneciente al grupo de evaluación comunicaciones del capítulo estudiantil.

$G7Max$: puntaje máximo a obtener por realizar las actividades tipo i perteneciente al grupo de evaluación reclutamiento de miembros para el capítulo estudiantil.

$G8Max$: puntaje máximo a obtener por realizar las actividades tipo i perteneciente al grupo de evaluación conversión de miembros del capítulo estudiantil al capítulo profesional.

$G9Max$: puntaje máximo a obtener por realizar las actividades tipo i perteneciente al grupo de evaluación participación del capítulo estudiantil en las actividades mundiales del IISE.

$G10Max$: puntaje máximo a obtener por realizar las actividades tipo i perteneciente al grupo de evaluación participación del capítulo estudiantil en las actividades regionales del IISE.

$Treq_{ij}$: tiempo de planeación requerido para la planeación y ejecución de la actividad tipo i en el grupo de trabajo tipo j .

Dh_{jk} : disponibilidad horaria tipo k de un integrante del comité tipo j para cada periodo en el horizonte de planeación.

$W0_{jk}$: cantidad de integrantes pertenecientes al comité j al inicio del horizonte de planeación.

$WMax_k$: cantidad máxima de personas pertenecientes a cada dedicación tipo k en el capítulo estudiantil.

Adicionalmente, el modelo caracterizado en la ecuación (1) muestra la función objetivo de maximización del puntaje obtenido por la evaluación realizada por el IISE de los capítulos estudiantiles por año. Las ecuaciones (2) y (3) establecen un límite inferior y superior de la evaluación otorgada por el IISE en la elaboración de la evaluación de desempeño, factor que puede en múltiples casos proporcionar un tamaño de los diferentes comités de trabajo tipo k , así como el tamaño total requerido del capítulo, las dedicaciones horarias de cada miembro. La ecuación (4) muestra la obligatoriedad de realizar las actividades de planeación de actividades y elaboración del UCAR para cada horizonte de planeación del trabajo realizado por el capítulo estudiantil. En la ecuación (5) es posible restringir el número total de actividades de cada tipo i que es posible realizar durante todo el horizonte de planeación, mientras la ecuación (6) muestra una restricción acerca de la suma total de actividades de diferente tipo i a realizar durante cada periodo t . Las ecuaciones (7) a (16) presentan restricciones de agrupación de actividades a realizar durante todo el horizonte de planeación, esto es, la clasificación de actividades que son evaluadas como un conjunto de tareas, las cuales otorgan un puntaje máximo como conjunto. Se destaca que puede realizarse una combinación lineal de actividades diferente por cada grupo, durante todos los periodos de ejecución de actividades otorgando una misma evaluación.

La ecuación (17) muestra una restricción típica de capacidad de recursos, en la cual el tiempo requerido por cada comité de trabajo tipo j para planear y ejecutar todas las actividades tipo i en un periodo t está limitado por la disponibilidad de tiempo con la que cuenta cada comité de trabajo j , integrado por miembros con disponibilidad tipo k durante cada periodo t . Esta restricción es útil para capítulos estudiantiles con pocos miembros, ya que puede asignar el personal de manera eficiente a cada tipo de grupo de trabajo y establecer una prioridad de actividades, así como los requerimientos de trabajo. La ecuación (18) presenta una restricción de balance de miembros con dedicación horaria tipo k en los comités de trabajo tipo j durante los meses t , la cual hace flexible la asignación y programación de personal al interior del capítulo estudiantil, así como las necesidades de selección y reclutamiento de nuevos miembros o la programación de descansos o desvinculación del grupo estudiantil.

La ecuación (19) permite limitar el número de integrantes de cada comité de trabajo j en cada periodo t al número total de integrantes del capítulo de acuerdo con su vinculación horaria. Las ecuaciones (20) al (23) muestran en las dos primeras fórmulas la realización de actividades como la planeación e informe de evidencias para evaluación en un término de tres meses antes de su entrega y requerimiento, así como la realización de al menos una reunión de miembros por semestre en las dos últimas de estas fórmulas. Las ecuaciones (24) y (25) presentan respectivamente las restricciones lógicas y de tipo de variable del modelado matemático realizado, en las cuales las variables de personal se consideran de carácter entero, mientras las variables respecto a las actividades con carácter binario.

Resultados

Ante los parámetros estimados y la formulación del modelo matemático para la programación de actividades y la asignación de personal del capítulo estudiantil, se realizó su solución a través del software GAMS® en su versión 23.9.5, en la cual se procesaron 604 restricciones con 840 variables el cual procesado en 1309 iteraciones con el algoritmo CBC. Se encontró respuesta a las interrogantes acerca del tipo de actividades y meses en las cuales estas se realizarán, el número de miembros a asignar, retirar o reclutar para cada comité y el puntaje deseado que otorgará el IISE al revisar las evidencias.

Los resultados del modelo propuesto muestran que, para alcanzar la puntuación máxima de 100 puntos, es posible realizar 28 de las 47 actividades propuestas, donde se destaca que algunas actividades importantes excluidas de la programación se relacionan con ponencias en eventos, organización de conferencias, visitas a colegios, ser universidad sede de la conferencia regional, publicar noticias del capítulo en el periódico de la universidad y/o boletín, así como la participación en competencias en diseño e innovación, simulación o artículos, debido al consumo de recurso de manera intensiva.

En otro aspecto, las actividades a realizar en una mayor cantidad de ocasiones se relacionan con las visitas a plantas con cuatro actividades, reuniones de oficiales con tres repeticiones, uso de redes sociales para contacto con tres veces y participación en eventos profesionales con igual cifra. Se destaca que solo es requerida una reunión general de miembros por semestre, tal como se estipulo en el programa lineal mixto, debido a su consumo razonable de recursos.

También se puede afirmar que el resto de las actividades es posible realizarlas una sola vez durante el año, de acuerdo con la programación obtenida; esto indica limitaciones en número o simplemente programación eficiente de recursos humanos. Ante las consideraciones ya señaladas del periodo de receso escolar, para los meses de junio, julio, diciembre y enero, se evidencia actividad únicamente en enero en la actividad de direccionamiento de membrecía; en relación a los meses con mayor actividad de acuerdo con la programación de actividades establecida, los meses de marzo con ocho actividades por realizar, septiembre con siete, mayo y febrero seis actividades serán los más congestionados y con actividad, factor que afectara a los integrantes del capítulo que tendrán que disponer de mayor dedicación en esos periodos del horizonte de planeación. Esta programación de actividades puede ser consultada en detalle en la tabla 3, en la que, mediante la asignación de un dígito uno (1), se simboliza la realización de una actividad para cada periodo de tiempo, así como la falta asignación simbolizará el caso contrario de ausencia de actividad en cada periodo.

Tabla 3. Programación de actividades del capítulo estudiantil para un año de gestión

Actividad	Periodo												
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	
Informe de líderes												1	
UCAR												1	

Tabla 3. Programación de actividades del capítulo estudiantil para un año de gestión

Actividad	Periodo											
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Informe planeación estratégica					1							
Reuniones officers	1				1					1		
Reuniones generales miembros					1						1	
Visitas a plantas	1			1						1	1	
Ponencias en Eventos												
Participación evento profesional										1	1	1
Participación semana ingeniería							1					
Organización conferencias												
Eventos sociales	1						1					
Tutoría/Mentorías										1		
Visitas a colegios												
Consejería de carrera						1						
Invitación de miembros profesionales										1		
Proyectos comunitarios												
Lista de distribución												
Uso de redes sociales para contacto/distribución de capítulos				1	1						1	
Sitio web capítulo												
Uso de redes sociales para contacto/distribución de capítulos												
Envío de comunicaciones a áreas de miembros profesional					1							
Publicar las noticias del capítulo en el periódico de la universidad y/o boletín												
Otras actividades de comunicación	1											
Cartas/mails/volantes para nuevos miembros												
Cartas/mails/volantes para carreras de Ingeniería indicadas	1											
Mesa/stand en la feria/evento de actividades estudiantiles												
Direccionamiento de membresía									1			
Envío de carta/mail a otras disciplinas de ingeniería.					1							
Reunión de membresía de transición celebrada										1		
Hoja de trabajo de reclutamiento de membresía de transición completada					1							
Participación en competición video IISE Industry Advisory Board				1								
Participación de artículos a competencia patrocinadas por IISE												

Tabla 3. Programación de actividades del capítulo estudiantil para un año de gestión

Actividad	Periodo											
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Participación en competencia de diseño e innovación												
Participación de equipo en competencia de simulación												
Organizar actividades o sesiones estudiantiles en la conferencia anual de IISE				1								
Asistir a la conferencia anual de IISE												
Asistir a Volunteer Leadership Training en la conferencia anual de IISE						1						
Seguimiento de redes sociales con redes del capítulo de la organización nacional												
Otras actividades de participación como webcast, webinarios, etc.												
Envío de delegados oficiales a la conferencia regional	1											
Participación en competencia de artículos técnicos a nivel regional						1						
Ser universidad sede de la conferencia regional												
Visitar otros capítulos fuera actividades de conferencia											1	
Realizar actividades conjuntas con otros capítulos fuera de actividades de conferencia												1
Tener representante en el capítulo profesional IISE												
Enviar artículos de interés periodístico al equipo de liderazgo regional de IISE												
Seguimiento de redes sociales con redes del capítulo de la organización regional											1	

Fuente: elaboración propia.

En cuanto al requerimiento de personal por cada comité, es posible afirmar que el comité de publicidad es uno de los más activos, ya que requiere en seis de los doce meses, un número de integrantes de uno o dos personas con dedicación alta, mientras en el restante de meses se requieren de forma adicional la asignación de un integrante con dedicación media y baja, según la programación de actividades.

De forma similar, el comité académico requiere en siete de los doce meses integrantes con dedicación alta y media, lo cual muestra una menor actividad, ya que este comité tendrá dos temporadas de trabajo limitadas a los meses de agosto, septiembre y octubre, en un primer lapso, y en febrero, marzo, abril y mayo, en el segundo.

Tabla 4. Programación de integrantes del capítulo estudiantil en comités y dedicación

Comité (j)	Dedicación (k)	Periodo (t)											
		May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.
Publicidad	Alta	1			1	1	1					2	1
	Media										1		
	Baja				1								
Académico	Alta				1						1	1	1
	Media	1				2	1						
	Baja												
Financiero	Alta					1				1	1		
	Media	2		3	1								
	Baja											4	3
Operaciones	Alta	2			2	1					1	1	
	Media								1				1
	Baja							1					
Dirección	Alta	1				1					1		
	Media				1		1	1		1		3	1
	Baja												

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Programación de ingreso de integrantes del capítulo estudiantil en comités y dedicación

Comité (j)	Dedicación (k)	Periodo (t)											
		May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.
Publicidad	Alta	1			1							2	
	Media										1		
	Baja				1								
Académico	Alta				1						1		
	Media	1				2							
	Baja												
Financiero	Alta					1				1			
	Media	2		3									
	Baja											4	
Operaciones	Alta	2			2						1		
	Media								1				1
	Baja							1					
Dirección	Alta	1				1					1		
	Media				1		1			1		3	
	Baja												

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Programación de reasignaciones de integrantes del capítulo estudiantil en comités y dedicación

Comité (j)	Dedicación (k)	Periodo (t)											
		May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.
Publicidad	Alta		1					1					1
	Media											1	
	Baja					1							
Académico	Alta					1							
	Media		1				1	1					
	Baja												
Financiero	Alta						1					1	
	Media		2		2	1							
	Baja												1
Operaciones	Alta		2			1	1						1
	Media								1				
	Baja							1					
Dirección	Alta		1				1					1	
	Media					1			1		1		2
	Baja												

Fuente: elaboración propia.

Por su parte, el comité financiero requiere asignaciones de personal con las diferentes dedicaciones durante ocho meses de los doce contemplados en el horizonte de planeación, lo cual indica una carga de trabajo fluctuante, acorde a la elaboración de informes y el detalle de este tipo de actividad, tal como se requiere previo a la elaboración de los informes de gestión para la evaluación durante marzo y abril de cada horizonte de planeación.

Para el comité de operaciones, es posible afirmar un requerimiento de integrantes en ocho de los doce meses, con dedicación alta en cinco periodos de al menos uno o dos integrantes, mientras que, para los meses diferentes a la asignación con este tipo de dedicación alta, es necesario asignar un miembro con dedicación baja y media. Finalmente, el comité de dirección es requerido en nueve de los doce meses, lo que implica de uno a tres integrantes con los cuales se puede coordinar las actividades a realizar durante el horizonte de planeación.

En cuanto al número de integrantes que se asignarán por periodo, es posible afirmar que para marzo se asignarán cuatro integrantes al comité financiero, el cual es el movimiento con mayor número en toda la programación; seguido por asignación de tres integrantes a los comités de dirección en el mismo mes, y tres integrantes al comité financiero durante julio. En un análisis complementario respecto del número de integrantes por reasignar, los meses de junio, abril y septiembre presentan cifras de siete, cinco y cinco reasignaciones respectivamente, lo cual corresponde a la programación de actividades ya señalada.

Estos comportamientos respecto al número de integrantes necesarios por asignar a cada comité bajo cada tipo de dedicación es posible verlos con detalle en la tabla 4; mientras que los miembros del capítulo que pueden ser asignados a cada comité se detallan en la tabla 5; así como los miembros que no son requeridos y pueden reasignarse se presentan en la tabla 6.

Conclusiones

A través de este proyecto de investigación fue posible obtener la programación de actividades de un capítulo estudiantil al IISE, mediante técnicas de optimización, lo cual representó un ejemplo para los estudiantes de herramientas propias de la ingeniería industrial.

Este ejercicio curricular sirve como ejemplo de modelamiento de sistemas bajo restricciones, para su réplica por otras instancias y capítulos estudiantiles en aras de mejorar el desempeño en la realización de actividades a través del uso eficiente del capital humano disponible en los capítulos estudiantiles.

El modelo presentado es de sumo interés para capítulos estudiantiles con número reducido de miembros, ya que puede mostrar cómo mejorar su desempeño y lograr evaluaciones adecuadas, aprovechando de mejor manera la disponibilidad de personal, a través de una estrategia que pretende iniciar con un proceso de adquisición de conocimiento en un sistema de gestión de conocimiento como elemento didáctico (Guevara-Bolaños *et al.*, 2016).

En cuanto a la programación de actividades, esta es generada a través de la combinación de diferentes parámetros que pueden ser modificados por los capítulos estudiantiles según sus normas y reglas, permitiendo flexibilidad a los grupos estudiantiles respecto la dedicación horaria y labores a realizar de los miembros en cada asignación.

Con relación a los resultados obtenidos para el capítulo estudiantil en estudio, la programación de actividades sirve en este momento como parámetro mínimo e inferior de ejecución de tareas, lo cual ha repercutido en compromisos mínimos para sus integrantes con el propósito de lograr una evaluación alta ante el IISE.

References

- [Aarabi y Hasanian, 2014] Aarabi, M. y Hasanian, S. (2014). Capacity planning and control: A review. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(8), 975-985. ↑Ver página 80
- [American Institute of Chemical Engineers, 2017] American Institute of Chemical Engineers (AIChE). (2017). *The global of chemical engineers*. <https://www.aiche.org/community/membership> ↑Ver página 78

- [American Nurses Association, 2015] American Nurses Association (ANA). (2015). *Code of ethics for nurses with interpretive statements*. Silverspring. 10.4037/ccn2015639 ↑Ver página 78
- [American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2017] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). (2017). Student Zone. *Shaping Tomorrow's Built Environment Today*. <https://www.ashrae.org/communities/student-zone> ↑Ver página 78
- [Ander-Egg, 2001] Ander-Egg, E. (2001). *El trabajo en equipo*. Editorial Progreso. ↑Ver página 78
- [Bicova y Fulemova, 2014] Bicova, K. y Fulemova, J. (2014). Support of effective planning in the workshop laboratory at the Department of Machining Technology in Pilsen. *Procedia Engineering*, 69(2014), 1008-1014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.083> ↑Ver página 80
- [Domínguez, 1994] Domínguez M., J. (1994). *Dirección de operaciones: aspectos tácticos y operativos en la producción y servicios*. McGraw-Hill. ↑Ver página 79
- [Gallego-Torres et al., 2020] Gallego-Torres, A., Bustos-Velazco, E. y Reyes-Roncancio, J. (2020). Guided models for teaching students research in science and engineering. *Tecnura*, 24(66), 85-94. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.16133> ↑Ver página 80
- [Giorgiadis y Athanasion, 2013] Giorgiadis, P. y Athanasion, E. (2013). Flexible long-term capacity planning in closed-loop supply chains with remanufacturing. *European Journal of Operational Research*, 225, 44-58. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.09.021> ↑Ver página 80
- [González Martín y Génova Fuster, 2008] González Martín, M. y Génova Fuster, G. (2008). Innovación docente a la luz de Bolonia: trabajo en equipo y revisiones cruzadas para convertir al alumno en protagonista de su proceso de aprendizaje. *Revista Electrónica Teoría de la Educación. Educación y Cultura en la Sociedad de la Información*, 9(1), 127-141. <https://doi.org/10.14201/eks.20257> ↑Ver página 78
- [Guevara-Bolaños et al., 2016] Guevara-Bolaños, J., González-Guerrero, E. y Cavanzo-Nisso, G. (2016). Sistema de gestión del conocimiento para generación de escenarios didácticos para la diversidad. *Tecnura*, 20(edición especial), 108-121. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.11683> ↑Ver página 97
- [Guoxuan y Demeulemeester, 2013] Guoxuan, M. y Demeulemeester, E. (2013). A multilevel integrative approach to hospital case mix and capacity planning. *Computers & Operations Research*, 40(9), 2198-2207. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.01.013> ↑Ver página 80

- [Huang, *et al.*, 2009] Huang, H., Lee, L., Song, H. y Thomas Eck, B. (2009). SimMan. A simulation-model for workforce capacity planning. *Computers & Operations Research*, 36, 2490-2497. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.10.003> ↑Ver página 80
- [Institute of Industrial & Systems Engineers, 2017] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2017). *Advancing technology for humanity*. https://www.ieee.org/membership_services/membership/renew/index_renew.html ↑Ver página 78
- [IISE, 2017] Institute of Industrial & Systems Engineers (IISE). (2017). *Student chapters*. <http://www.iise.org/Details.aspx?id=620> ↑Ver página 78, 79, 81, 82, 83
- [Johnson y Montgomery, 1974] Johnson, L. y Montgomery, D. (1974). *Operations research in production planning, scheduling, and inventory control*. Wiley & Sons. ↑Ver página 78, 80
- [Kalenatic, 2001] Kalenatic, D. (2001). *Modelo integral y dinámico para el análisis, planeación y programación y control de las capacidades productivas en empresas manufactureras*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. ↑Ver página 79
- [Li *et al.*, 2012] Li, Y., Dai, C. y Huang, G. (2012). An interval-parameter chanceconstrained dynamic programming approach for capacity planning under uncertainty. *Resources, Conservation and Recycling*, 62, 37-50. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.02.010> ↑Ver página 80
- [Martinez-Costa *et al.*, 2014] Martinez-Costa, M., Mas-Machuca, M. y Benedito, E. (2014). A review of mathematical programming models for strategic capacity planning in manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 153(C), 66-85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.03.011> ↑Ver página 80
- [Niño-Villamizar y Román-Castillo, 2016] Niño-Villamizar, Y. y Román-Castillo, R. (2016). El rol de los trabajos de grado como motor de aprendizaje organizacional. El caso de los programas académicos de Tecnología Industrial e Ingeniería de Producción en la Universidad Distrital (Bogotá, D.C.). *Tecnura* 20(edición especial), 132-146. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.11685> ↑Ver página 78
- [Pinedo, 1995] Pinedo, M. (1995). *Scheduling*. Prentice Hall. ↑Ver página 78
- [Prieto *et al.*, 2014] Prieto, L., Valderrama, C. y Allain-Muñoz, S. (2014). Internacionalización en casa. En C. M. Nupia (Ed.), *Reflexiones para la política de internacionalización de educación superior en Colombia* (pp. 159-191). Ministerio de Educación Nacional. ↑Ver página 78
- [Ramezani *et al.*, 2012] Ramezani, R., Rahmani, D. y Barzinpour, F. (2012). An aggregate production planning model for two phase production systems: Solving with genetic algorithm and tabu search. *Expert Systems with Application*, 39, 1256-1263. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.134> ↑Ver página 80

- [Sánchez-Gómez, 2017] Sánchez-Gómez, I. (2017). *Propuesta de un modelo de carga docente para la optimización en asignación de recursos pedagógicos*. Universidad Técnica Federico Santa María. ↑[Ver página 78](#)
- [Taha, 2012] Taha, H. (2012). *Introducción a la investigación de operaciones*. Pearson. ↑[Ver página 80](#)
- [Todorovic, 1995] Todorovic, J. (1995). *Tehmonoloski sistemi*. MRLJES. ↑[Ver página 79](#)
- [Viles et al., 2012] Viles, E., Jaca, C., Campos, J., Serrano, N. y Santos, J. (2012). Evaluación de la competencia de trabajo en equipo en los grados. *Revista de Ingeniería de Organización*, 1(46), 67-75. ↑[Ver página 78](#)
- [Zelenovic, 1987] Zelenovic, D. (1987). *The design of production systems*. Naucna. ↑[Ver página 79](#)



Geomicrobiology for Deep Uranium Prospection in the Neuquina Basin, Argentina

Geomicrobiología para prospección de uranio en profundidad en la cuenca Neuquina, Argentina

Adalgisa Scotti ¹, Guillermo Rojas ², Cristina Marcela Servant ³, Pablo Catálfamo ⁴, Nicolás Valle ⁵, Martín Pedro Gómez ⁶

Fecha de Recepción: 02 de Noviembre de 2020

Fecha de Aceptación: 01 de Abril de 2021

Cómo citar: Scotti., A. Rojas., G. Servant., C.M. Catálfamo., P. Valle., N. y Gómez., M.P. (2021). Geomicrobiología para prospección de uranio en profundidad en la cuenca Neuquina, Argentina. *Tecnura*, 25(69), 101-119. <https://doi.org/10.14483/22487638.17059>

Abstract

Context: Microbiological prospecting for oil is a widely used methodology and is described in many published works. In uranium (U) mining it is not frequent, although there are some researchers who refer to some microorganisms as *Bacillus* sp, which are used in bioremediation and they could be able to do it in prospection. In this work we propose a microbiological relationship for prospection by U, hypothesizing that it will be affected by the presence of deep U. The main objective of this work is to show that the microbiological relationship formed by *Bacillus* sp /Total Aerobic Mesophiles (B/TAM) is related to the presence of U and it be able to use as complementary technique for prospection by U.

Methodology: The soil sampling carried covers an area of 600 Km² into oil-uraniferous Neuquina basin; it is near to the town of Colonia Catriel, Province of Río Negro, Argentina. Spectrometric U, total chemical U, labile U and microbiological determinations from 62 sites with sampling by duplicated and 8 wells with different U concentration in depth were studied. Furthermore, Radon Emanometry and Zoneograms of total, labile and spectrometric U concentrations and of the microbiological relationship were analyzed. Results were subjected to a statistical analysis using principal components and linear regression.

¹Biochemist, PhD in Biology, Bio-environmental laboratory ICES CNEA, FRSR UTN, Department of Exact and Natural Sciences, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina; Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, CNR, Italy. Email: scotti@cnea.gov.ar

²Geologist. Raw Materials Exploration Management, CNEA Azopardo 313 Godoy Cruz, Mendoza, Argentina. Email: grojas@cnea.gov.ar

³Mining Technician, Chemistry student at the Department of Exact and Natural Sciences of Universidad Nacional de Cuyo. Raw Materials Exploration Management, CNEA. Azopardo 313 Godoy Cruz, Mendoza, Argentina. Email: cservant@cnea.gov.ar

⁴Superior Mining Technician. Raw Materials Exploration Management, CNEA. Azopardo 313 Godoy Cruz, Mendoza, Argentina. Email: catalfamo@cnea.gov.ar

⁵Geologist, Raw Materials Exploration Management, CNEA. Azopardo 313 Godoy Cruz, Mendoza, Argentina. Email: nicolasvalle@cnea.gov.ar

⁶Physicist, PhD in Physics Scientific Director, ICES-CNEA. Centro Atómico Constituyentes- General Paz 1499, Villa Maipú, Buenos Aires, Argentina. Email: mpgomez@cnea.gov.ar

Results: This work shows a highly significant statistical linear correlation between geomicrobiology on surface and U concentration in depth ($R= 0,59$ $p<0,002$).

Conclusion: Research should continue to link other elements from geochemistry as well as geophysical characteristics that could be complemented with this geomicrobiological technique.

Keywords: neuquina basin, biological organisms, prospection, uranium.

Resumen

Contexto: La prospección microbiológica de petróleo es una metodología ampliamente utilizada y se describe en muchos trabajos publicados, sin embargo en la minería de uranio (U) no es frecuente, si bien hay investigadores que se refieren a algunos microorganismos como *Bacillus* sp, los cuales se utilizan en biorremediación y podrían ser capaces de hacerlo en prospección. En este trabajo se propone una relación microbiológica para la prospección por U, hipotetizando que se verá afectada por la presencia de U profundo. Nuestro objetivo principal es mostrar que la relación microbiológica formada por *Bacillus* sp /Mesófilos Aerobios Totales (B/TAM) se relaciona con la presencia de U y se puede utilizar como técnica complementaria para su prospección.

Método: El muestreo de suelo fue realizado en un área de 600 Km² en la cuenca Neuquina; Colonia Catriel, Provincia de Río Negro, Argentina. Para las determinaciones de U espectrométrico, U total, U lábil y la microbiología, se muestrearon 62 sitios por duplicado y se estudiaron 8 pozos con diferente concentración de U en profundidad. Además, se analizaron la emanometría de Radón y las zoneografías de las concentraciones de U total, lábil y espectrométrico y de la relación microbiológica. Los resultados se sometieron a un análisis estadístico mediante análisis de componentes principales y regresión lineal.

Resultados: Este trabajo muestra una lineal correlación estadística altamente significativa ($R= 0,59$ $p<0,002$) entre la geomicrobiología en superficie y la concentración de U en profundidad.

Conclusiones: Las investigaciones deben continuar vinculando otros elementos de la geoquímica y de la geofísica que podrían complementarse con esta técnica geomicrobiológica.

Palabras clave: cuenca Neuquina, organismos biológicos, prospección, uranio.

Table of Contents

	Página
Introduction	103
Methodology	108
Results	109
Statistic Analysis	112
Discussion	112
Conclusions	116

Funding	116
Acknowledgements	116
Referencias	116

Introduction

The association of uranium (U) mineralization with bitumen is widely known in numerous deposits of this element. Although oil cannot be considered as a source of U or as the fluid that transports it, it is a fundamental element for its precipitation.

In the province of La Pampa, to the northeast and east of the study area, (Llambías *et al.*, 2003) recognize two igneous suites for the Choiyoi Group (Permo-Triassic), one shoshonitic and the other trachydacitic to rhyolitic. The shoshonitic suite presents high contents of Th and U, and the rocks associated with this suite could constitute the uranium source for the proposed model (Figure 1).

The biodegradation of oils associated with U mineralization was observed in various worldwide deposits, for example, in Temple Mountain, Utah, and in Grand Canyon, Arizona, both in the United States of America, as well as in Lodève, Francia (Landais, 1989). In Argentina, the close relationship of U with heavy oil has been verified at the Huemul deposit, which is located in the department of Malargüe, Mendoza. It is the only national example, and it has been exploited by CNEA for several decades (Rojas, 2013). The mineralization and the genesis of the deposit were studied in several works. Particularly, (Brodtkorb, 1966) determined the existence of four types of heavy oil as asphalt, discriminated by their optical properties. Only one of them was the carrier of pitchblende (Uraninite), which is the predominant mineral in the mine. Subsequent studies worldwide conclusively determined that this reducing capacity, on favorable conditions of Eh and pH (Figure 2), is given by a process of progressive destruction of linear hydrocarbons, thus leaving a viscous and heavy residue. Biodegraded oils are known to be present in the Neuquina basin, and its shallow sectors show noticeable effects of this process, mainly, in those near the edges of the basin, also called platform (Figure 3). This is an example of the fact that biodegradation is a regional phenomenon, given the wide distribution, both underground and on the surface, of biologically altered hydrocarbons. The best precipitating conditions occur at shallower depths and in sectors closer to the edge of the basin. These oils were originated in the Vaca Muerta Formation.

The characteristic gamma ray peaks and the relationship they have with the paleo-environmental framework interpreted from the electrical profiles, allow inferring that they have hosted U mineralization in channel facies, possibly in roll front and/or tabular deposits (IAEA, 2001). It is known that U is transported into fluid media by oxidizing agents, and that the interface is formed when these agents are moved down slope through a water-saturated sand, rich in pyrite, carbonaceous material, and/or the presence of petroleum compounds such as methane (CH₄) and sulphhydic acid (H₂S), a

reducing medium. The fluid oxidizing agents that carry U^{6+} move through the reducing medium, which alters the host sandstone and causes a precipitation of U^{4+} . It is likely that hydrocarbons play a key role in the precipitation of U in the area since there are numerous oil and gas fields with reducer compounds such as CH_4 and H_2S , among others. It is considered that this type of deposit reflects the dynamics of fluid flow to the transport of U in the groundwater that moves down slope within a confined aquifer in response to a hydraulic gradient. The proposed scheme has a paleo-environmental contribution area located to the east with a regional slope to the west, as shown by the change in facies and thick clastic decrease in that direction.

Mineralizing fluids have circulated according to the gradient deposited U in sandstones with the best petrophysical properties, and the age of mineralization may be syngenetic or early postgenetic. The hydrogeologic Andean system recharges freshwater along a preferential direction due to the current regional slope of the system, which is therefore not ruled out as a contribution from the West to the East. In this case, the age of mineralization would be postgenetic.

Some bacteria can convert dangerous chemical compounds into less harmful forms for life, and,

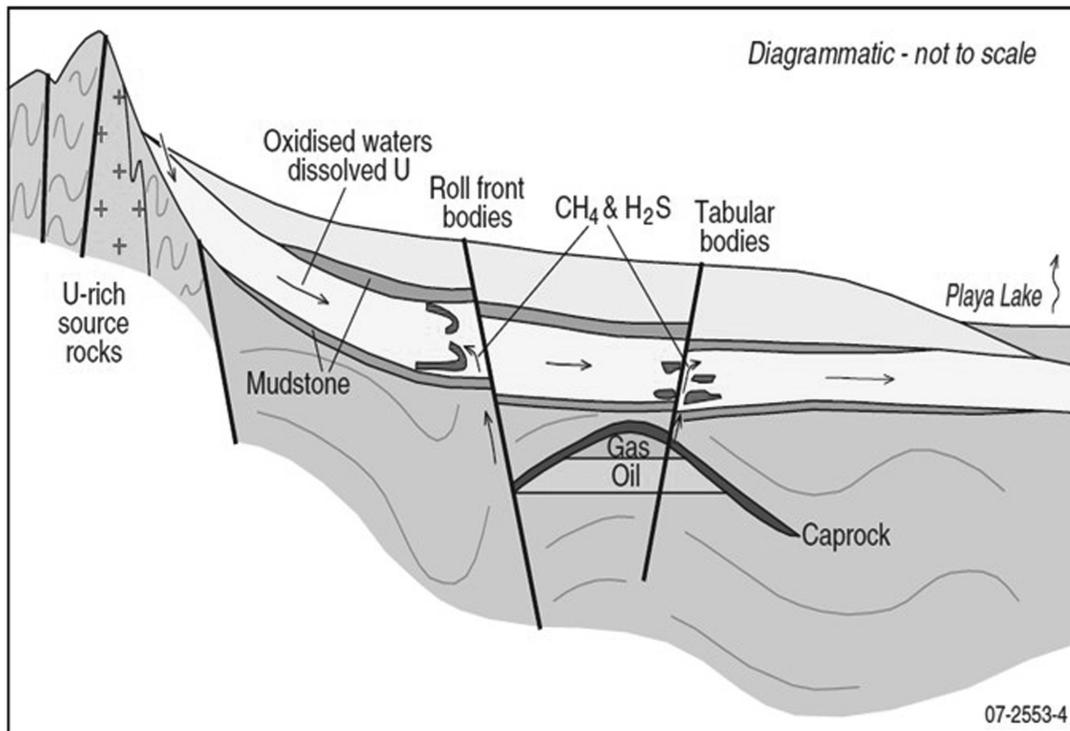


Figura 1. Diagram of uraniferous mineralization in the presence of hydrocarbons (Jaireth *et al.*, 2008)

Source: The authors are Jaireth *et al.* 2008.

Postulated Eh-pH Conditions During Transportation and Deposition of Uranium

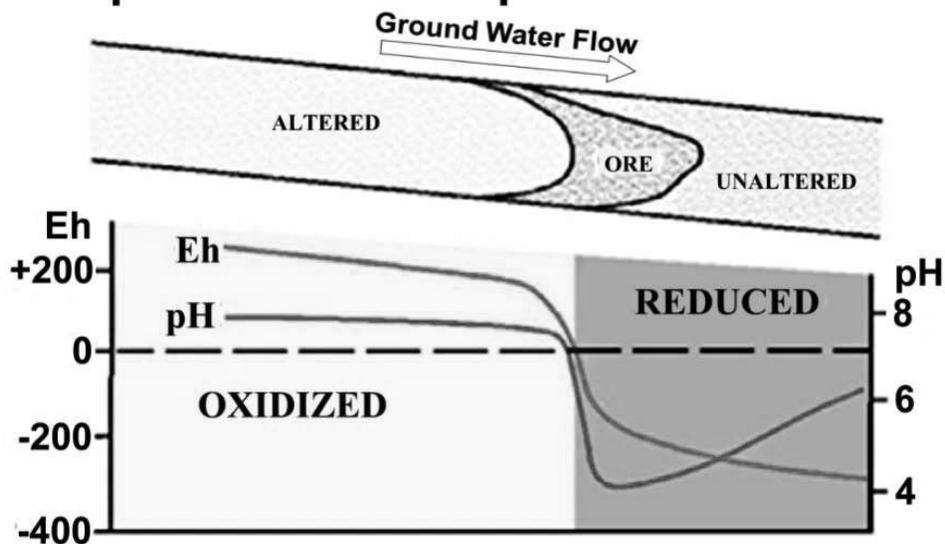


Figura 2. Graph of Eh-pH conditions during U transport and deposition, modified from (Pourbaix, 1974)

Source: Authors.

for that reason, they are ideal for the cleaning of areas with oil spills and, in general, in the treatment of toxic residues (Batista-García *et al.*, 2011, ?). The acceptors most commonly used by microorganisms are oxygen (in the case of aerobic organisms), nitrates, iron (III), sulfates, and carbon dioxide (in anaerobic organisms). At the surface level, the bacterial composition is modified by the presence of different concentrations of gases from oil biodegradation. The scientific basis of microbiological prospecting methods for oil exploration consists of the migration of gaseous light hydrocarbons, such as methane (C1), ethane (C2), propane (C3), and butane (C4), from the reservoir to the surface, where they are assimilated by specific groups of microorganisms that inhabit the soil of these ecosystems (McLee *et al.*, 1972, Rasheed *et al.*, 2008, Rasheed *et al.*, 2014). There are also various biomarkers that indicate the oil's type of degradation. These biomarkers are predominantly organic compounds resulting from microbial biodegradation (de Vasconcellos, 2009, Zhao *et al.*, 2018). There are bacteria that oxidize methane, ethane, propane, and butane, and they also use these gases exclusively as their only source of carbon and energy for growth. The density of these bacteria varies depending on the presence of hydrocarbon reservoirs (Horvitz, 1939). Microorganisms such as *Bacillus sp.* belong to a large family of oil-degrading species (Tucker & Hitzman, 1994). This strain is capable of forming spo-

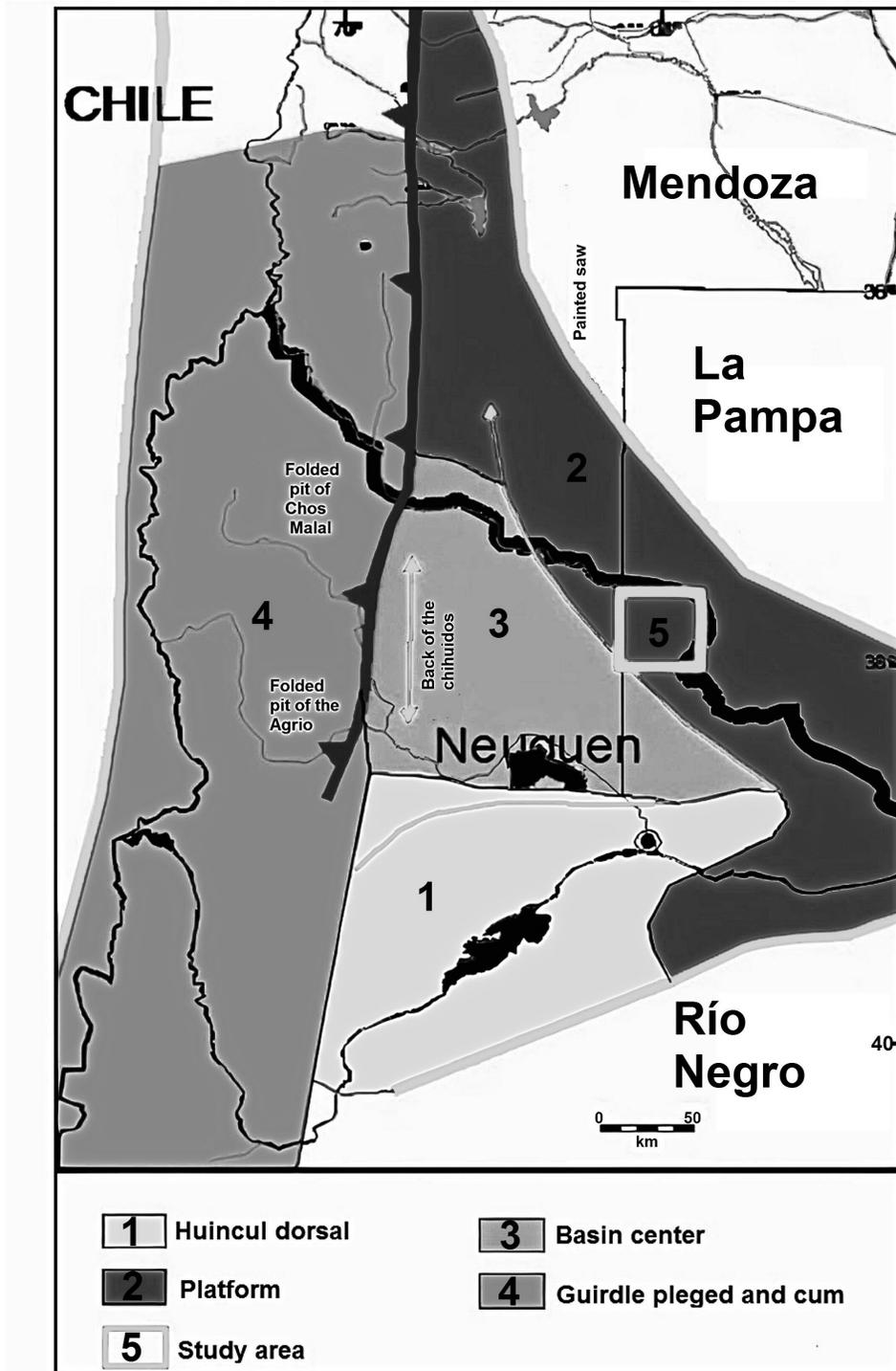


Figura 3. Hydrocarbon deposits on the edge of the Neuquén basin with heavy oil or evidence of possible biodegradation

Source: Authors.

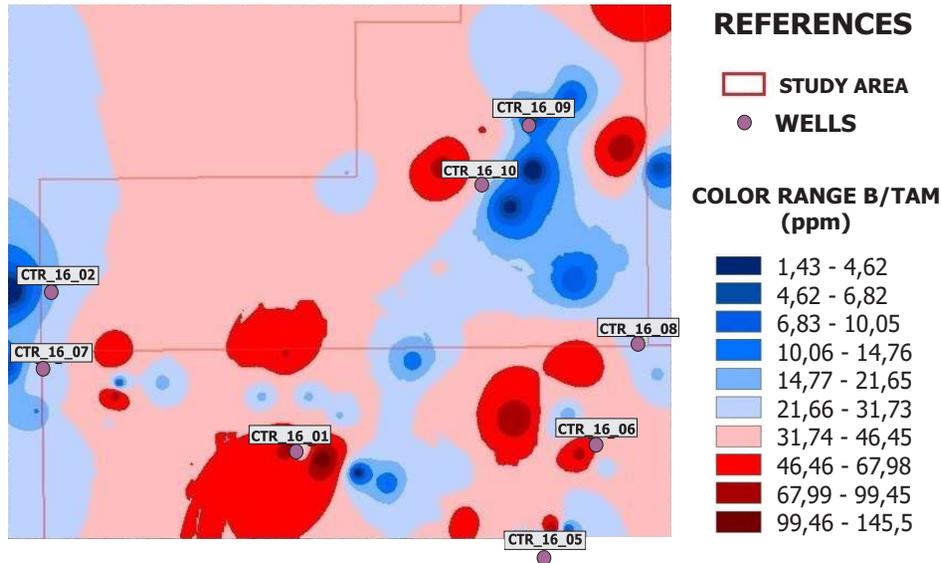


Figura 4. Zoneography of microbiological relationship (B/TAM) in study area (green dots correspond to wells; red areas correspond to positive zones, while blue areas correspond to negative zones for microbiological relationship)

Source: Authors.

res, which makes it more resistant to aggressive environments (DuTeau *et al.*, 1998, Narváez-Flórez *et al.*, 2008). Considering the above, the total aerobic mesophilic ratio (B/TAM) of *Bacillus sp.* was deemed suitable for on-surface testing of the density of bacteria that use hydrocarbons from oil degradation carried out by anaerobic bacteria in depth. The main purpose of this work is to incorporate an indirect microbiological method for surface prospecting of deep U deposits. To this effect, this study was based on the following hypotheses:

1. Hydrocarbons produced from heavy biodegraded oil play a key role in U precipitation in the study area.
2. The amount of *Bacillus sp.* in relation to the amount or total aerobic mesophilic bacteria is an indicator of microbiological anomalies produced in U basins in the presence of biodegraded heavy oil.
3. The geological and geophysical characteristics of the soil allow the surface geomicrobiology to be linked with deep deposits.

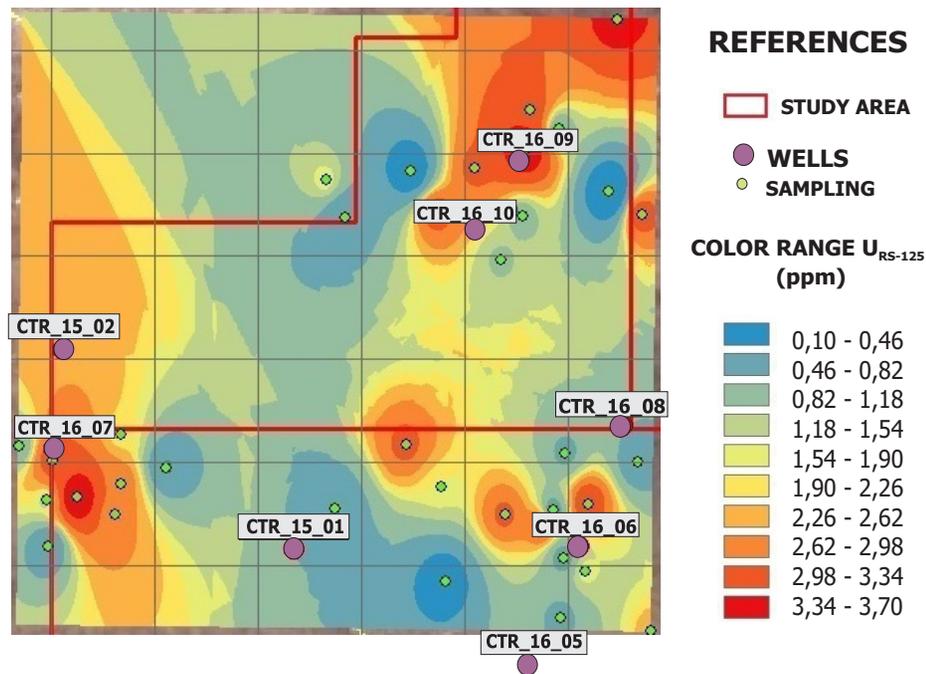


Figura 5. Zoneography for the spectrometrical U (U RS-125) concentration (ppm) in the study area (red dots are correspond to wells; green dots correspond to U RS-125 sample points)

Source: Authors.

Methodology

The study area covers 600 km² of the Neuquina basin. 124 soil samples corresponding to 62 sites were collected for microbiological, spectrometric, and chemical analysis. Spectrometric measurements were made with field equipment (Spectrum-RS 125). The soil samples were sent to the geochemistry laboratory of the Regional Cuyo, where labile U was determined with a Scintrex UA3 laser fluorescence equipment, while the determination of total chemical U was carried out at the Centro Atómico Constituyentes (CAC), using the ICP-Masa technique. Radon 222 emanometry measurements in soils were made using a device buried one-meter deep, carrying a sensitive material. The sheets of sensitive material were removed after around 60 days of exposure and were processed in the CAC's dosimetry laboratories. The impact count was conducted with specific image processing software (Image-Pro plus). In total, 10 drill holes with a total of 1907 m were drilled, along with their corresponding geophysical log profiles and obtaining the necessary information for U prospecting. Out of these, 8 wells were selected for this work. The microbiological determinations were carried out by the Department of Sciences Applied to the Industry of the University of Cuyo. They were carried

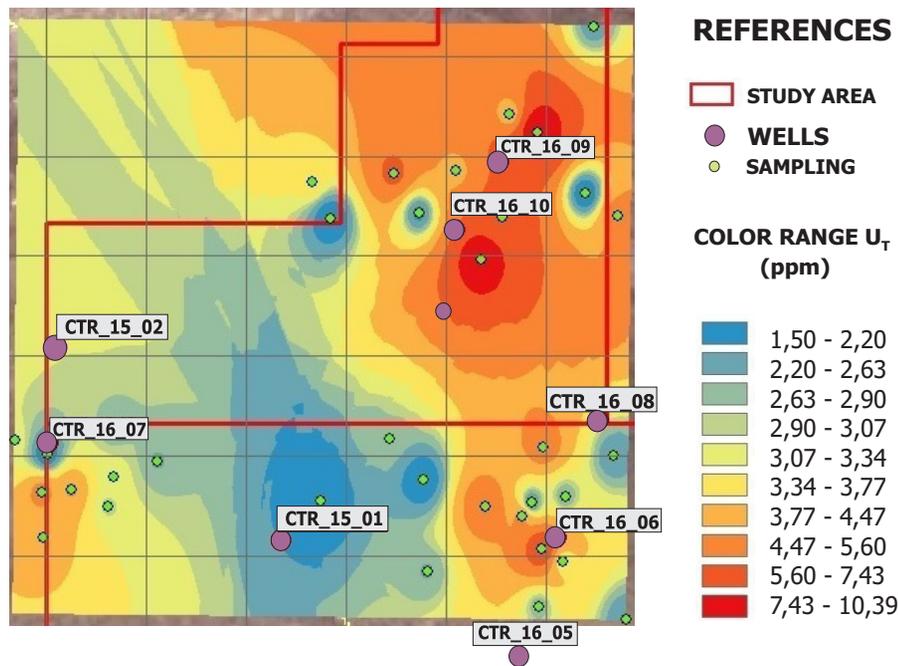


Figura 6. Zoneography for the total chemical total U (U_{Total}) concentration (ppm) in the study areas (red dots correspond to wells; green dots correspond to U_{Total} sample points)

Source: Authors.

out on material collected in a sterile way, which was kept in a refrigerator during the field work. The total aerobic mesophilic bacteria count was performed on agar, plate count, and incubation at 37 °C for 24 h. *Bacillus sp.* testing was carried out on agar for plate counting and incubation at 37 °C for 24 h, with prior heating of the sample up to the boiling point, and confirmed by the visualization of colored endospores. Statistical analysis was performed using principal components analysis and multiple linear regression with the Statistica software. Zoneographs of the labile U, total chemical U, spectrometrical U, and B/TAM were performed using the Arcgis software, Geographic Information system 10.2, and with the Inverse Distance Weighted interpolation method (IDW).

Results

The graphs corresponding to the zoneographies are shown below, where it is possible to see how the values of the variables analyzed are distributed in the territory under study. Zones with severe positive anomalies are marked with red and the negative zones with blue. (Figures 4, 5, and 6). Wells were named: CTR-15-01 (well 1), CTR-15-02 (well 2), CTR-16-05 (well 5), CTR-16-06 (well 6), CTR-

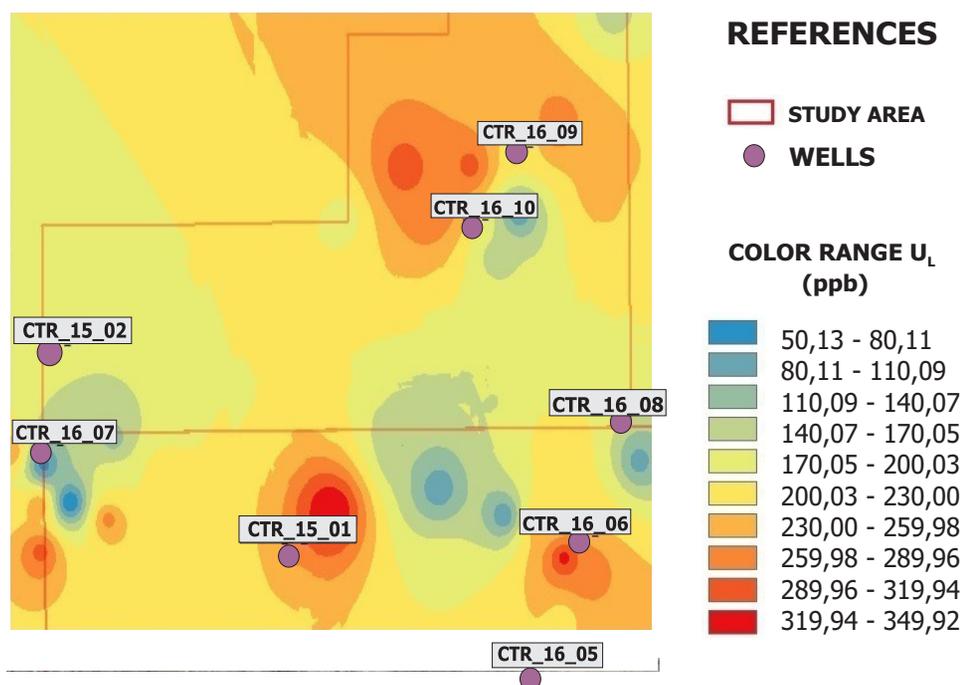


Figura 7. Zoneography for the labile U (U_L) ppb in the study area (green dots correspond to wells)

Source: Authors.

15-07 (well 7), CTR-16-08 (well 8), CTR-16-09 (well 9), CTR-16-10 (well 10).

Comparative studies were focused on the red boxed areas with elevated values of the B/TAM relationship (Figure 4), elevated spectrometrical U values (Figure 5), elevated total chemical U (Figure 6) and labile U (Figure 7). These zones form a triangle that contains the eighth oil-uraniferous wells marked with their names in the image. In Figure 4, B/TAM zoneography is positive (red zone) at wells 1 and 6, while it is negative (blue zone) at wells 2, 7, 9, and 10. Issues with access to the fields prevented the sampling of the southern region of well 5; the partial result shows a positive northern area and some negative areas in the Northwest and Northeast. The cutoff values to determine positive and negative zones in the zoneography of Figure 4 were considered in the range of 21,6-31,7%, values greater than 31,7 were considered positive. In Figure 5, the spectrometrical U zoneography shows wells 6, 10, and 9 as positive, whereas the negative wells are 1, 2, and 7. In Figure 6, the zoneography of the total chemical U values shows positive values at wells 2, 7, and 9, while there are negative values at wells 1 and 6. In Figure 7, the labile U zoneography shows well 1 as positive and 7 and 8 as negative, while 5, 6, and 10 are weak positives. To test uranium content in depth, a profile mapping (Figure 8) and chemical record data were used (Karkanis, 2016, Karkanis, 2018, Valle, 2016). Figure

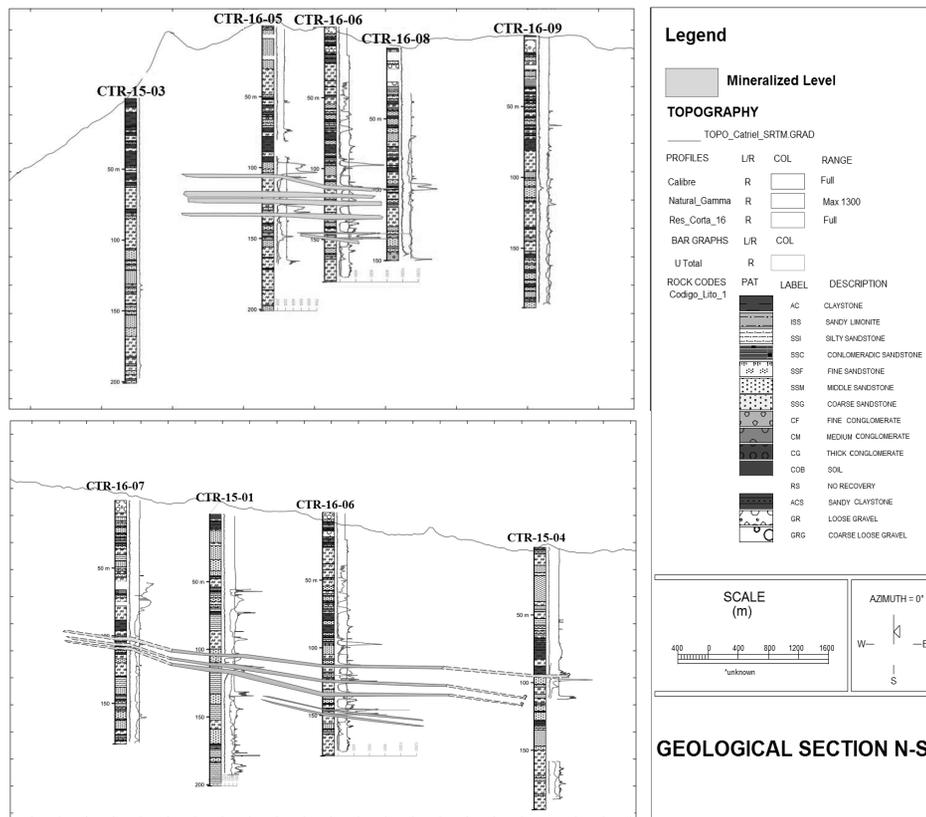


Figure 8. Geological profiles where uraniumiferous mineralization and geophysical anomalies are visualized

Source: (Valle, 2016, Karkanis, 2018).

8 shows the concentration of U in depth of each well. Results show that wells 1, 5, and 6 present important U mineralization, while 2, 7, 8, 9, and 10 are negative. By analyzing these results, it is observed that the B/TAM values correspond significantly to positive and negative U mineralization areas in depth.

Figures 8 and 9 show that the preferential lithology for U mineralization is fine sands, although conglomerates are also important. The identified mineralization corresponds to uranofan and uranium and titanium oxides, which are found mainly between the clasts of the rock, filling spaces in an irregular way and surrounding pyrites and ilmenites.

The mineralization records (Figure 8) indicate that well 6 is the most mineralized, followed by 1 and 5. The clay level in the mineralized wells is higher in 5, followed, in turn, by 1 and 6. Well 1 has the most superficial clay level (Figure 9).

Radon 222 emanometry (Figure 10) is used to determine permeability in geological research. In this work, it is important to consider the similarity of the negative and positive permeable areas in

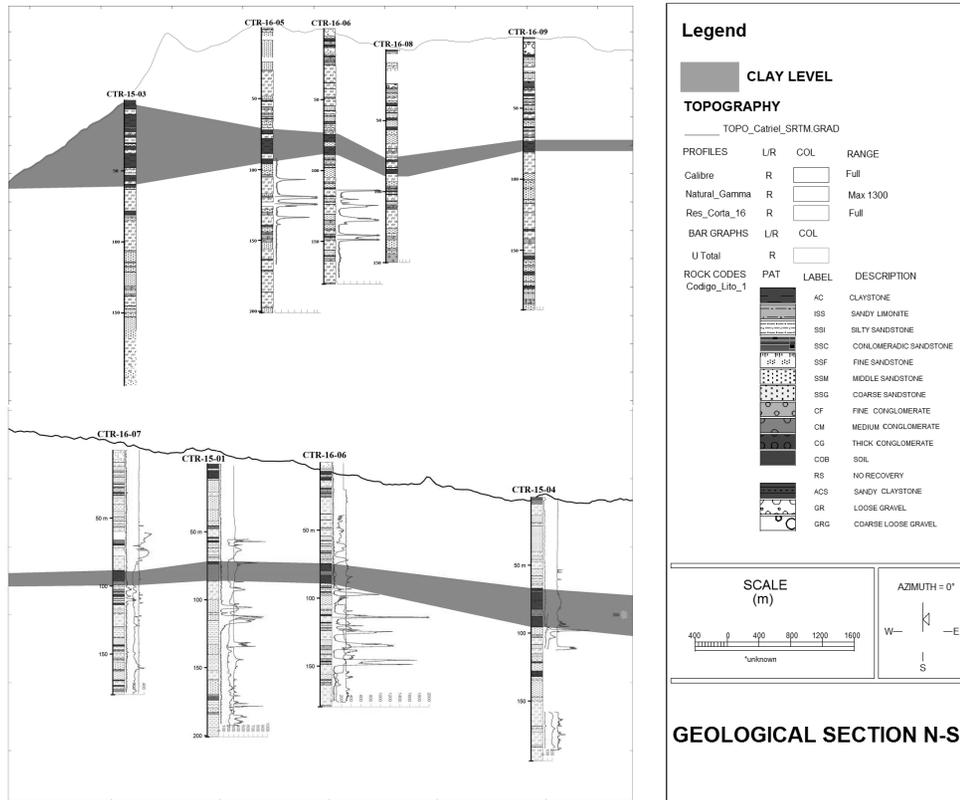


Figura 9. Geological profiles where the upper-level clay layer is visualized

Source: (Valle, 2016, Karkanis, 2018).

comparison with clay level and B/TAM ratio (Figures 9 and 4).

Additionally, a selection was made of the points close to the wells to study their microbiological relationships, and their U content was recorded at a depth of 150-200 m (Table 1).

Statistic Analysis

A linear regression was performed between the B/TAM ratio values of points near mineralized wells in relation to the U concentration (U ppm) found in depth (150-200 m).

The principal component analysis (PCA) yielded the following dendrogram (Figure 11).

Discussion

In this article, we considered that the Neuquina Basin had a relationship between biodegraded oil and U deposits, as was also considered by (Rojas, 2013, Scotti et al., 2019). (Zhao et al., 2018) also

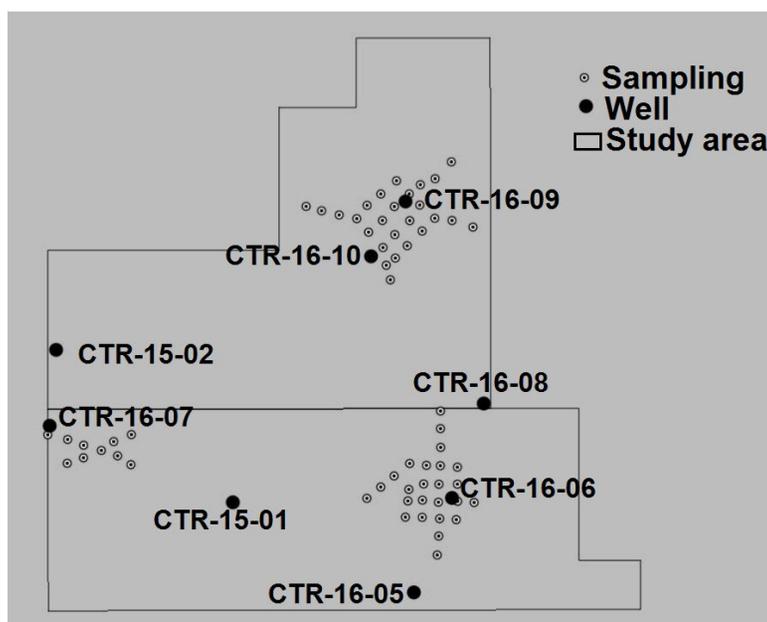


Figura 10. Radon 222 emanometry (little dots indicate positive areas, and big dots show the wells)

Source: (Karkanis, 2018).

reported the same correspondence in the Qianjiadian area, Songliao Basin, NE China. These researchers show that the reducing potential generated by the biodegradation of oil allows U to precipitate and demonstrate the appearance of C26-C31 17α , 21β 25-norhopanes, typically resulting from strong biodegradation.

Biodegraded oil emits gases such as methane, propane, and butane, which ascend through the porous layers of the basin edge and impact on the surface, changing the proportion of bacteria in the A horizon of the soil, as shown in the literature (Rasheed *et al.*, 2008, McLee *et al.*, 1972, Batista-García *et al.*, 2011). We found that the proportion of aerobic bacteria on the surface was affected in the Neuquina Basin platform as also found by other researchers (Hubert & Judd, 2010). In this sense, we used *Bacillus* sp and total mesophilic bacteria for prospecting U deposits. In previous papers, *Bacillus* sp was considered to be a widespread bacterium with environmentally-friendly applications in U bioremediation (Song *et al.*, 2019). The Microbial Prospecting for Oil and Gas (MPOG) method has reported a success rate of 90 %, which suggests the excellence of this methodology and future development trends (Rasheed *et al.*, 2014). Although *Bacillus* sp is reported as useful by previous research to prospect oil in depth, we have not found any bibliography on the bacterial relationship B/TAM described in this work for prospecting oil and/or U. The microbiological methodology allowed us to identify deep mineralization zones in wells 1 and 6, while wells 7, 2, 8, 9, and 10 were negative. Well

Table 1. B/TAM % of samples near mineralized wells and their U concentration at 150-200 m of depth

B/TAM %	U depth (ppm)	Well
29	60	7
5,64	60	7
14,4	60	7
8,33	60	7
1,88	10	2
145,45	150	1
68,96	150	1
94,44	150	1
40	150	1
37,5	150	1
50	150	1
38,06	400	5
66,67	400	5
100	400	5
38,26	400	5
7,14	70	8
20,8	70	8
3,68	40	9
28,4	40	9
7,69	40	9
1,4	10	10
3,39	10	10
75,9	450	6
77,8	450	6

Source: Authors.

5 showed a small microbiological positive zone in the North, with a different result in comparison with the U concentration in depth, but matching the chemical zoneographies of U (total and labile chemical) and the emanometry. Another important factor to take into account in this new complementary method is the permeability of the soil, so the gases from the degraded hydrocarbons rise to the surface and impact the microbial ratio. In this regard, an important level of clay was registered in

Table 2. Regression summary for the dependent variable B/TAM % $R= 0,58970750$ $R^2= 0,34775493$ Adjusted $R^2= 0,31810743$ $F(1,22)=11,730$ $p < 0,0024$ (output from Statistica software)

N= 24	b*	Std.Err. - of b*	b	Std.Err. - of b	t(22)	p-value
Intercept			16,78895	9,37024	1,791731	0,086943
U depth (ppm)	0,589707	0,172185	0,14297	0,041744	3,424858	0,002423

Source: Authors.

well 5. Therefore, there is a high correlation between the sites with positive emanometry and the sites with high B /TAM (Figures 4 and 10). In the dendrogram (Figure 9), it can be seen how the B/TAM ratio is very closely linked to the total U on the surface. The regression summary (Table 2) shows the significant relationship between B/TAM and U depth. Just as with deep oil and gas prospecting,

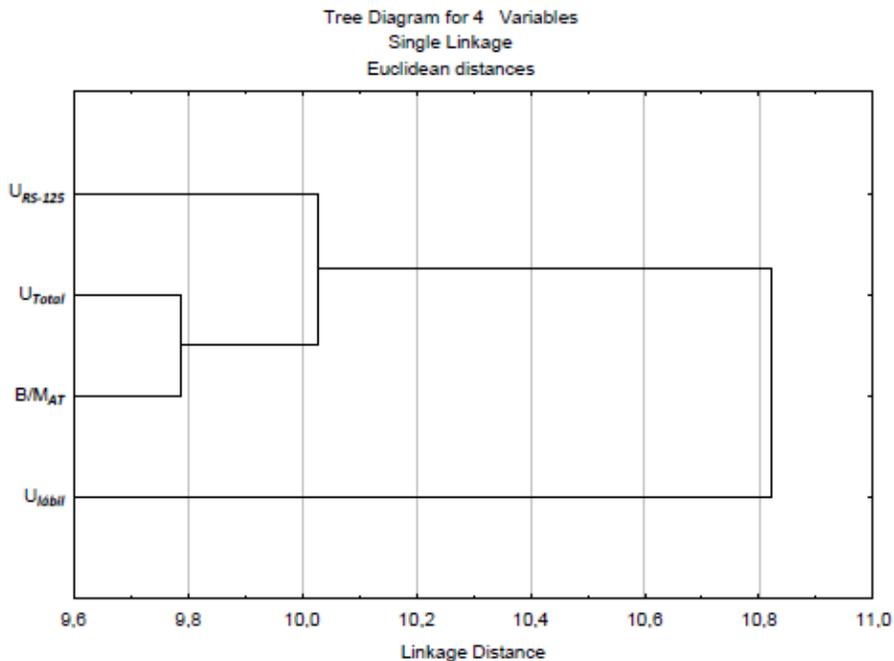


Figura 11. Dendrogram from PCA for U_{RS-125} (spectrometric U), U_{Total} (chemical), U_L (chemical), and B/TAM % (microbiological ratio in percentage) (output from Statistica software)

Source: Authors.

geomicrobiology is suitable for prospecting, particularly the B/TAM relationship presented in this work; it is a very good complementary methodology for prospecting uranium deposits in oil basins with evidence of biodegraded oil.

Conclusions

In uranium-oil basin platform edge areas where there is evidence of biodegraded heavy oil, the B/TAM bacterial composition can be used as a complementary U prospecting method. The geomicrobiological anomalies have a very significant correlation with the areas of surface geochemical anomalies and depth mineralization. The B/TAM relationship showed a highly significant linear correlation ($R= 0,59$ $p < 0,002$) with a deep U concentration.

Negative areas for geomicrobiology match the perforations without U value. B/TAM resulted to be a very good indicator of U mineralization in depth when its value is superior to 21,6- 31,7%. An important element to consider for the effectiveness of the method is the permeability of the geological strata, which follows the same patterns as the Radon 222 emanometry.

We must continue working on the link of geomicrobiology with anomalies in depth, soil permeability, emanometry, porosity, and geophysical variables.

Funding

We offer our sincere thanks to Management of Technological Development and Special Projects (GDTyPE) and Management of Exploration Raw Materials (GEMP) departments of the National Atomic Energy Commission for helping to fund this project.

Acknowledgements

We would like to thank Lic. Julio Salvarredi, Lic. Sebastián Vazquez, Lic. Gastón León, and Lic. Constantino Karkanis for their collaboration in this work.

Referencias

[Batista-García *et al.*, 2011] Batista-García, R. A., Quesada-Quintero, A. L., Sánchez-Reyes, A., López-Guerra, S., & Domínguez-Saliñas, Z. (2011). Microbiología y biotecnología aplicadas a la exploración y producción petroleras. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 42,(1), 35-41. ISSN: 0253- 5688 Editorial CENIC, La Habana, Cuba. <https://www.redalyc.org/pdf/1812/181221683007.pdf> ↑Ver página 105, 113

- [Brodtkorb, 1966] Brodtkorb, M. (1966). Mineralogía y consideraciones genéticas del yacimiento Huemul, provincia de Mendoza. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, XXI(3), 165-179. ISSN 00044822. URL: <https://revista.geologica.org.ar/raga/issue/view/170/93>
↑Ver página 103
- [de Vasconcellos, 2009] de Vasconcellos, S. P., Crespim, E., da Cruz, G. F., Senatore, D. B., Simioni, K. C. M., dos Santos Neto, E. V., Marsaioli, A. J., & de Oliveira, V. M. (2009). Isolation, biodegradation ability and molecular detection of hydrocarbon degrading bacteria in petroleum samples from a Brazilian offshore basin. *Organic Geochemistry*, 40(5), 574-588. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.02.006> ↑Ver página 105
- [DuTeau *et al.*, 1998] DuTeau, N. M., Rogers, J. D., Bartholomay, C. T., & Reardon, K. F. (1998). Species-Specific Oligonucleotides for Enumeration of *Pseudomonas putida* F1, *Burkholderia* sp. Strain JS150, and *Bacillus subtilis* ATCC 7003 in Biodegradation Experiments. *Applied and Environmental Microbiology*, 64(12), 4994-4999. <https://doi.org/10.1128/AEM.64.12.4994-4999.1998> ↑Ver página 107
- [Horvitz, 1939] Horvitz, L. (1939). On geomicrobial prospecting. *Geophysics*, 4, 210-228. <https://doi.org/10.1190/1.1440497> ↑Ver página 105
- [Hubert & Judd, 2010] Hubert, C., & Judd, A. (2010). Using Microorganisms as Prospecting Agents in Oil and Gas Exploration. In Timmis, K. N. (Ed.) *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77587-4_201 ↑Ver página 113
- [IAEA, 2001] International Atomic Energy Agency (IAEA). (2001). *GNIP Maps and Animations*. International Atomic Energy Agency. ↑Ver página 103
- [Jaireth *et al.*, 2008] Jaireth, S., McKay, A., & Lambert, I. (2008). Association of large sandstone uranium deposits within hydrocarbons. *AusGeo News*, 89. <http://www.ga.gov.au/ausgeonews/ausgeonews200803/uranium.jsp> ↑Ver página 104
- [Karkanis, 2016] Karkanis, C. (2016). *Informe Ejecutivo de prospección geoquímica de los cateos próximos a la localidad de Colonia Catriel, provincia de Río Negro y del cateo Lucas, provincia de La Pampa. Informe Interno*. CNEA. ↑Ver página 110
- [Karkanis, 2018] Karkanis, C. (2018). *Informe Técnico*. CNEA. ↑Ver página 110, 111, 112, 113
- [Landais, 1989] Landais P. (1989). *Biodegradation of oils in uranium deposits, Metallogenesis of uranium deposits: proceedings of a Technical Committee Meeting on Metallogenesis of Uranium Deposits / organized by the International Atomic Energy Agency and held in Vienna, 9-12 March 1987*. The Agency. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:20084211 ↑Ver página 103

- [Llambías *et al.*, 2003] Llambías, E. J., Quenardelle, S., & Montenegro, T. (2003). The Choiyoi Group from central Argentina: A subalkaline transitional to alkaline association in the craton adjacent to the active margin of the Gondwana continent. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(4), 243-257. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(03\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(03)00070-1) ↑Ver página 103
- [McLee *et al.*, 1972] McLee, A. G., Kormendy, A. C., & Wayman, M. (1972). Isolation and characterization of n-butane-utilizing microorganisms. *Canadian Journal of Microbiology*, 18(8), 1191-1195. <https://doi.org/10.1139/m72-186> ↑Ver página 105, 113
- [Narvárez-Flórez *et al.*, 2008] Narvárez-Flórez, S., Gómez, M. L., & Martínez, M. M. (2008). Selección de bacterias con capacidad degradadora de hidrocarburos aislados a partir de sedimentos del Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 37(1), 61-75. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2008.37.1.182> ↑Ver página 107
- [Pourbaix, 1974] Pourbaix, M. (1974). *Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions*. National Association of Corrosion. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1806-4_4 ↑Ver página 105
- [Rasheed *et al.*, 2014] Rasheed, M. A., Hasan, S. Z., Srinivasa Rao, P. L. S., Boruah, A., Sudarshan, V., Kumar, B., & Harinarayana, T. (2014). Application of geo-microbial prospecting method for finding oil and gas reservoirs. *Frontiers of Earth Science*, 9, 40-50. <https://doi.org/10.1007/s11707-014-0448-5> ↑Ver página 105, 113
- [Rasheed *et al.*, 2008] Rasheed, M. A., Veena Prasanna, M., Satish Kumar, T., Patil, D. J., & Dayal, A. M. (2008). Geo-microbial prospecting method for hydrocarbon exploration in Vengannapalli Village, Cuddapah Basin, India. *Current Science*, 95(3). URL: <https://www.jstor.org/stable/24102760> ↑Ver página 105, 113
- [Rojas, 2013] Rojas, G. (2013, October 16-18). *Depósitos de uranio en areniscas fluviales y marino marginales en la plataforma de la cuenca Neuquina* [Conference presentation]. X Congreso de Geología Económica, San Juan, Argentina. ↑Ver página 103, 112
- [Joshi *et al.*, 2008] Joshi, S., Barucha, C., & Desai, A. J. (2008). Production of biosurfactant and antifungal compound by fermented food isolated *Bacillus subtilis*. *Bioresource Technology*, 99(11), 4603-4608. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.07.030> ↑Ver página
- [Scotti *et al.*, 2019] Scotti A., Rojas, G., & Servant M., C. P. (2019). Geomicrobiología para prospección de Uranio en profundidad. In CNEA (Eds.), *Actas Resúmenes E-ICES 14*. CNEA. ↑Ver página 112
- [Song *et al.*, 2019] Song, J., Han, B., Song, H., Yang, J., Zhang, L., Ning, P., & Lin, Z. (2019). Nonreductive biomineralization of uranium by *Bacillus subtilis* ATCC-6633 under aerobic conditions. *Journal of Environmental Radioactivity*, 208-209, 106027. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106027> ↑Ver página 113

[Tucker & Hitzman, 1994] Tucker, J., & Hitzman, D. (1994). Detailed microbial surveys help improve reservoir characterization. *Oil and Gas Journal*, (United States) 92(23). OSTI Identifier 7013411-ISSN 0030-1388- URL: <https://www.osti.gov/biblio/7013411> ↑Ver página 105

[Valle, 2016] Valle, N. (2016). *Informe Técnico CNEA*. CNEA. ↑Ver página 110, 111, 112

[Zhao *et al.*, 2018] Zhao, L., Cai, C., Jin, R., Li, J., Li, H., Wei, J., Guo, H., & Zhang, B. (2018). Mineralogical and geochemical evidence for biogenic and petroleum-related uranium mineralization in the Qianjiadian deposit, NE China. *Ore Geology Reviews*, 101, 273-292. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.07.025> ↑Ver página 105, 112



Polielectrolito catiónico como coagulante empleado para remover aceites y grasas de aguas residuales de una industria láctea

Cationic polyelectrolyte as a coagulant used to remove oils and fats from wastewater of a dairy industry

Hernando Carlos Oñate Barraza ¹, María Alejandra Chinchilla Calderón ²

Fecha de Recepción: 23 de Noviembre de 2020

Fecha de Aceptación: 01 de Abril de 2021

Cómo citar: Oñate-Barraza., C.H. Y Chinchilla-Calderón., M.A. (2021) Polielectrolito catiónico como coagulante empleado para remover aceites y grasas de aguas residuales de una industria láctea. *Tecnura*, 25(69), 120-130. <https://doi.org/10.14483/22487638.15767>

Resumen

Contexto: Evaluar la eficiencia de un polielectrolito catiónico comercial como coagulante en el tratamiento de las aguas residuales de una industria láctea.

Métodología: Para realizar el montaje de las pruebas de jarras con 1 l de muestra de aguas residuales de una industria láctea, se utilizó un polielectrolito catiónico como coagulante. Cada una de las pruebas se realizó bajo condiciones de mezclado rápido a 150 r. p. m. (duración 1 min), mezclado lento a 30 r. p. m. (25 min) y reposo (30 min).

Resultados: Se realizaron pruebas de jarras, empleando dosis de coagulante de 100, 140, 180, 220 y 260 mg/l, obteniendo eficiencias de remoción para aceites y grasas, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno (DQO), y turbidez con el uso del coagulante, entre el 27%-62 %, 57%-89 %, 8 %-58 % y 26 %-88 %, respectivamente. La mejor concentración resultó ser la de 140 mg/l.

Conclusiones: Se concluyó que el polielectrolito catiónico comercial empleado como pretratamiento de coagulación constituye una opción para facilitar la remoción de aceites y grasas en la unidad de flotación por aire disuelto, del sistema de tratamiento de aguas residuales de la industria láctea.

Palabras clave: polielectrolito catiónico, coagulantes, flotación, aguas residuales, industria láctea.

Abstract

Context: To evaluate the efficiency of a commercial cationic polyelectrolyte as a coagulant in the treatment of ARILs.

Methodology: To make the assembly of the jar tests of 1L of sample of ARI, it was used a cationic polyelectrolyte as coagulant. Each of the test was made under conditions of fast mixture at 150 rpm (during 1 minute), slow mixture of 30 rpm (25 minutes) and resting time (30 minutes).

¹Magíster en Ingeniería Ambiental, ingeniero sanitario y ambiental. Docente Universidad Popular del Cesar. Valledupar, Colombia. Email: hernandoonate@unicesar.edu.co

²Magíster universitario en Sistemas Integrados de Gestión en la Prevención de Riesgos Laborales, la Calidad, el Medio Ambiente y la Responsabilidad Social; ingeniera ambiental y sanitaria. Docente Universidad Popular del Cesar. Valledupar, Colombia. Email: mariachinchilla@unicesar.edu.co

Results: There were made jar tests, using dose of coagulant of 100, 140, 180, and 260 mg/L, getting removal efficiency of Oils and Fats (O and F), OSH, COD and Turbidity with the use of the coagulant, between 27 %- 62 %, 57 %-89 %, 8 %-58 %,and 26 %-88 % respectively. The Best concentration was the one of 140mg/L.

Conclusions: It was conclude that the commercial cationic polyelectrolyte used as a pretreatment of coagulation constitute an alternative to improve the removal of O and F in the dissolved air flotation unit (DAF) from the wastewater treatment system of the dairy industry.

Keywords: cationic polyelectrolyte, coagulant, flotation, wastewater, dairy industry.

Tabla de Contenidos

	Página
Introducción	121
Metodología	123
Descripción de la industria láctea	123
Muestreo del sistema de aguas residuales de industrias lácteas	123
Determinación de los parámetros fisicoquímicos	124
Pruebas de coagulación/floculación (montaje de test de jarras)	124
Procesamiento de los datos	125
Resultados	125
Eficiencia de la prueba de coagulación/floculación con el coagulante catiónico	125
Conclusiones	128
Financiamiento	129
Referencias	129

Introducción

Una de las dificultades más importantes que se debe enfrentar durante el tratamiento de las aguas residuales de industrias lácteas (ARIL) es la reducción o eliminación de los sólidos suspendidos totales (SST), y los aceites y grasas (A y G). Según Benavides Camacho *et al*, (2006), el contenido de materia grasa en la leche fresca se estandarizó en un 3,0 % m/m. Aunque los componentes proteínicos y grasos son degradados por las enzimas microbianas, estos dejan sus productos de hidrólisis en la leche, por lo cual el contenido de materia grasa permanece constante.

En una industria láctea debido a la diversidad de productos que se procesan y a los sistemas de fabricación aplicados, los efluentes líquidos residuales se caracterizan por ser muy variables y se constituyen como los más contaminantes. Los procesos aplicados en el tratamiento de las aguas residuales, además de ser utilizados en la remoción de contaminantes presentes en estas aguas, deben reaccionar a una constante variabilidad en los caudales afluentes, como también a la concentración o composición de estas aguas residuales (Rodríguez Miranda *et al*, 2015).

En la industria láctea en estudio, los procesos de depuración han permitido en los últimos años tratar eficientemente las aguas residuales generadas por sus actividades. Sin embargo, recientemente se han presentado problemas en las unidades de tratamiento (flotación, reactor biológico y sedimentador secundario) por la alta concentración de sólidos, A y G, y el incremento de la materia orgánica, lo que repercute en la calidad del efluente final y en la constitución de sus lodos. Los lodos residuales de los tratamientos y procesos industriales son clasificados como residuos peligrosos, por lo que requieren de la aplicación de tratamientos especiales. Estos lodos están constituidos por una alta concentración de sólidos coloidales de carácter orgánico e inorgánico. Disponer este tipo de residuos se ha convertido en una problemática ambiental para la gran mayoría de países latinoamericanos, siendo pocos los que cuentan con métodos de disposición adecuados en sus principales ciudades (García Vaca *et al*, 2016).

Esto ha llevado a la búsqueda de nuevas alternativas que permitan la optimización de los procesos primarios y así mejorar el rendimiento de los secundarios, en cumplimiento con las normativas ambientales y sanitarias.

Como alternativas de solución a dicha problemática se destacan en el tratamiento de las aguas residuales los avances en los procesos de tratamiento fisicoquímicos (coagulación/floculación), ya que han mostrado una elevada eficiencia, al permitir la desestabilización de las partículas en suspensión y propiciar la formación de flóculos que puedan ser removidos por sedimentación o flotación, dependiendo del proceso en el que se implementen. Según De Sena *et al*. (2008), la eficiencia de los procesos de flotación para la remoción de A y G podría incrementarse con el uso de coagulantes y polímeros.

Por lo expuesto, el objeto de la investigación de este artículo es presentar un polielectrolito catiónico comercial como alternativa para la remoción de A y G de las ARIL, enmarcado en la prevalencia del criterio más eficiente para la selección del proceso de coagulación, teniendo en cuenta variables tan importantes como tipo y costo del coagulante, variaciones del pH, sedimentos generados, remoción de A y G, y eficiencia del tratamiento en general.

De acuerdo con Abia y Rodríguez (2002), los tratamientos fisicoquímicos son eficientes, convenientes y fáciles de aplicar a nivel industrial, siempre y cuando el residuo líquido a tratar no contenga materiales que reaccionen con el coagulante; que la dosificación de los reactivos sea en concentraciones y condiciones de reacción adecuadas; que en los procesos posteriores se mantengan condiciones de tiempos de residencia y condiciones de mezcla que no destruyan los flóculos conformados; que se disponga de un sistema de separación sólido- líquido adecuado y efectivo. Así, tradicionalmente

los contaminantes presentes en las aguas residuales han sido eliminados por coagulación química, que propician la neutralización de las cargas de partículas que se encuentran suspendidas o en forma coloidal, lo que resulta en la disminución de las repulsiones entre partículas, que son aglomeradas para su posterior precipitación (Arango Ruiz y Garcés Giraldo, 2007).

Los tratamientos fisicoquímicos están basados en la química y física de la coagulación, mediante la adición de un coagulante generalmente a base de sales de AL^{3+} o de Fe^{3+} , el cual libera sus iones positivos que desestabilizan y atraen los coloides cargados negativamente, neutralizando así su carga. El uso de polímeros permite la remoción de contaminantes que se encuentran emulsionados, suspendidos o disueltos. En este artículo se utilizó el coagulante 8100 NALCO®, que es un polielectrolito catiónico de peso molecular moderado, derivado del aluminio y del hierro, y cuya eficiencia ha sido ampliamente probada, para la clarificación de agua potable, industrial y aguas residuales, con la aprobación de la National Sanitation Foundation (NSF).

Metodología

Descripción de la industria láctea

La industria láctea está situada en el área urbana del municipio de Valledupar (Cesar, Colombia). Su principal producto es la leche en polvo con una productividad diaria aproximada de 88 toneladas, lo que equivale a 32 000 toneladas por año. Esta industria se ha constituido como bastión importante para la economía de la región, no solo por los empleos directos en su planta procesadora, sino por esa economía indirecta que se genera en los pequeños y grandes ganaderos de la región a los cuales les compra su insumo principal: leche cruda.

La industria láctea presenta un caudal constante de aguas residuales de aproximadamente 20 l/s, los que llegan en su totalidad a un sistema de tratamiento de aguas residuales (STAR), el cual está compuesto por un tamiz y una unidad de flotación (DAF, por su sigla en inglés) que forman parte del tratamiento primario; como tratamiento secundario, presenta un reactor biológico de lodos activados y un sedimentador secundario; para el tratamiento de los lodos cuenta con un digestor de lodos, una centrífuga para su concentración y un lecho de secado.

Muestreo del sistema de aguas residuales de industrias lácteas

Para la caracterización del ARIL, se recolectaron muestras compuestas en envases plásticos con capacidad de 2 l, constituidas por cinco alícuotas de 400 ml cada una; las muestras fueron tomadas con un intervalo de dos horas, obedeciendo a la jornada laboral de los operarios de la planta de tratamiento de agua residuales (PTAR), las tres primeras tomas se realizaron en los horarios de 7:00, 9:00 y 11:00 de la mañana, y las dos últimas en la jornada de la tarde en los horarios de 2:00 y 4:00 de la tarde. Con estas muestras se determinó la DQO, SST, SSV, NTK, P, alcalinidad, turbidez, temperatura

y potencial de hidrogeno (pH); para el parámetro específico, A y G se recolectaron alícuotas puntuales de 160 ml en envases de vidrio.

Para los ensayos de jarras, se llevó a cabo un muestreo puntual en jornada matutina dos veces por semana, durante cuatro semanas, recolectando un volumen por muestra de 20 l en el afluente de la unidad de flotación DAF. Para garantizar la representatividad y la preservación de todas las muestras, estas se almacenaron en frío a 4 °C y se llevaron en el menor tiempo posible al laboratorio para su caracterización y la aplicación de los ensayos correspondientes. Los ensayos de jarras fueron realizados el mismo día en que se tomó la muestra para evitar cambios en su composición. En los análisis aplicados para los ensayos de jarras se evaluaron parámetros como DQO, SST, turbidez, pH, temperatura y A y G. La DBO no se consideró en ninguno de los casos, debido que al analizar la DQO en esta se asume la totalidad de la materia oxidable en una muestra de agua ([García Ubaque et al., 2016](#)).

Determinación de los parámetros fisicoquímicos

Los métodos analíticos aplicados para la determinación de todos los parámetros fisicoquímicos de las ARIL se realizaron según los procedimientos descritos en el manual de métodos normalizados para el análisis de aguas potables y aguas residuales ([APHA, AWWA y WTPD](#)).

Pruebas de coagulación/floculación (montaje de test de jarras)

Las pruebas de coagulación/floculación se desarrollaron en un simulador de jarras E&Q® que cuenta con seis puestos para recipientes de 2000 ml de capacidad. Este permitió simular las condiciones de mezclado rápido a 150 r. p. m. (coagulación), mezclado lento a 30 r. p. m. (floculación) y reposo (sedimentación); en los montajes se emplearon cinco puestos para probar las diferentes dosis del coagulante, dejando el sexto como control en cada uno de los ensayos realizados. Según [Flórez Ramos et al. \(2017\)](#), al implementar la operación en pruebas a nivel de laboratorio o en planta piloto, se puede predecir el comportamiento y la factibilidad técnica que presentará una planta industrial en condiciones de operación similares.

Para el procedimiento se preparó el equipo de jarras limpiándolo y ajustando sus paletas; a cada una se agregó un litro (1 l) de la muestra del ARIL recolectada; se utilizó un polielectrolito catiónico como coagulante, el cual según el volúmenes de dosificación a utilizar se dispuso en jeringas desechables para su adición de manera simultánea. Cada prueba se realizó bajo condiciones establecidas de mezclado rápido (duración 1 min), mezclado lento (25 min) y reposo (30 min).

Los ensayos se realizaron por triplicado, a una temperatura de 25 °C ± 1 °C. Los parámetros fisicoquímicos de cada muestra se determinaron antes y después de aplicada la prueba jarras. Como criterio para determinar la concentración de dosificación óptima se consideró la menor concentración del coagulante que removiera la mayor cantidad de A y G, así como los que presentaron mayor

capacidad clarificadora.

El coagulante utilizado, 8100 NALCO®, es un polielectrolito catiónico de peso molecular moderado, desarrollado para la clarificación de agua potable, industrial y aguas residuales, con la aprobación de la National Sanitation Foundation (NSF). Es líquido y viene en una presentación de 55 galones, con un peso neto de 238 kg, lo que representa una concentración de 1 144 781 mg/l. Para iniciar el procedimiento analítico se prepara inicialmente una solución madre al 1 % p/v de concentración, y posteriormente por dilución de esta última se establecen los volúmenes a dosificar para las concentraciones de dosificación de 100, 140, 180, 220 y 260 mg/l.

Procesamiento de los datos

La determinación de los parámetros fisicoquímicos DQO, SST, turbidez y pH, siguiendo las metodologías descritas, se realizó por triplicado, mientras que las concentraciones de A y G se trabajaron en dos repeticiones. Los valores obtenidos se sometieron a un análisis estadístico, donde se empleó el diseño experimental completamente aleatorio, acompañado de la prueba comparativa de Tukey con un nivel de significancia de 0,01, con la finalidad de evaluar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos. En la caracterización de las ARIL los valores representan el promedio de las muestras con su respectiva desviación estándar, máximos y mínimos.

Resultados

Las ARIL se caracterizan por tener una gran carga orgánica representada en DQO y grasas que se refleja en el gran impacto en el medio ambiente, especialmente en el recurso hídrico. La aplicación de tratamientos fisicoquímicos que involucran el uso de polímeros desestabilizantes representa una alternativa para aumentar la eficiencia en el tratamiento dado a estas aguas residuales, permitiendo optimizar el funcionamiento de los procesos unitarios que integran el sistema de depuración, y alcanzar las remociones deseadas. A continuación se describe el comportamiento del coagulante catiónico empleado en el tratamiento de las ARIL para la remoción de A y G, SST, DQO y turbidez presentes en dichas aguas.

Eficiencia de la prueba de coagulación/floculación con el coagulante catiónico

Los resultados en cuanto A y G empleando el coagulante catiónico, con dosis de 100, 140, 180, 220 y 260 mg/l y un control que representa el tratamiento sin coagulante, se aprecian en la figura 1. Se encontraron concentraciones de A y G después de aplicada la prueba de simulación entre 16 mg/l y 26 mg/l, y eficiencias entre el 62 % y 37 %, de la cual la mejor remoción se presentó con la dosis de 140 mg/l del coagulante catiónico, presentando remociones de A y G superiores al 62 % (16 mg/l) en comparación a la concentración inicial de la muestra de 41 mg/l de A y G. Aunque

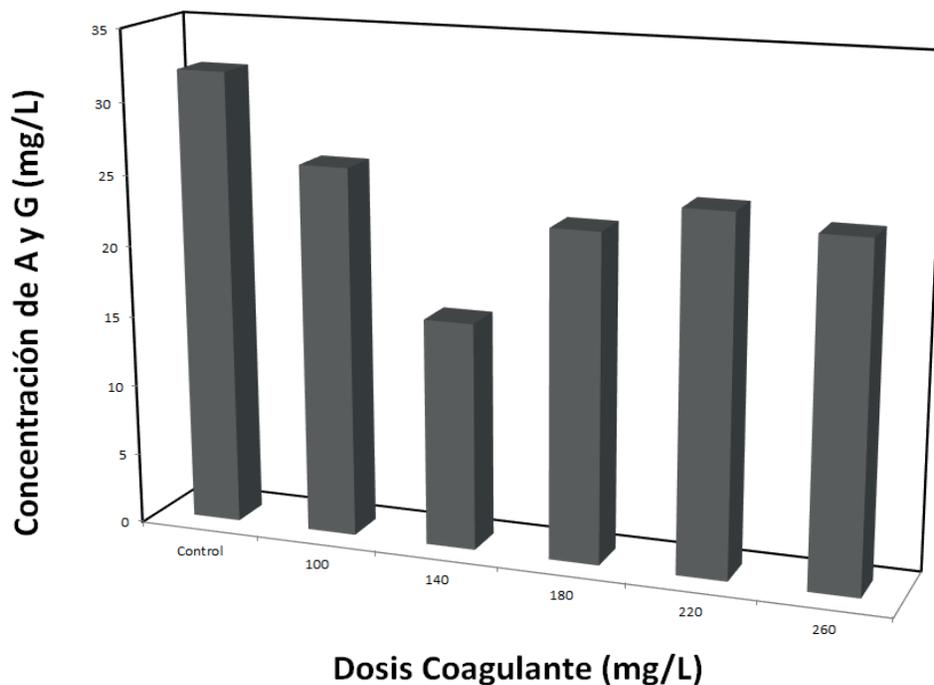


Figura 1. Comportamiento del parámetro A y G con el polielectrolito catiónico

Fuente: elaboración propia.

no se alcanzaron los mismos resultados por [Abia y Rodríguez \(2002\)](#), quienes aplicando un proceso de coagulación/floculación con aguas residuales de industrias lácteas, encontraron rendimientos en remoción de A y G, superiores al 90 %, debido a la eficacia en la adsorción de estas en el proceso de coagulación/floculación. En cuanto a la capacidad de sedimentación natural del agua sin la ayuda del coagulante catiónico, cuantificada en la jarra control, esta solo alcanzó una remoción de 22 %, demostrando cómo el uso del compuesto químico (coagulante) busca la ruptura de emulsiones de aceite en agua, consiguiendo la coalescencia de las fases que componen la emulsión ([Martínez Navarro, 2007](#)).

Las variaciones de la DQO en la prueba de simulación con el polielectrolito catiónico, aplicada a una muestra de ARIL con concentración inicial promedio de 800 mg/l de DQO, se observan en la figura 2, donde luego del proceso de sedimentación se encontraron concentraciones entre 340 mg/l y 733 mg/l, con eficiencias de remoción entre 8 % y 58 %, siendo las dosis de 140 mg/l y 180 mg/l las que tuvieron mejor comportamiento en reducción de la DQO, con un 57 % y 58 %, respectivamente. En cuanto a la jarra, se presentó una remoción del 25 % de la DQO, lo que permite establecer en un 33 % la participación del coagulante en la remoción de la DQO presente en las ARIL. Estas eficiencias son comparables a las halladas por [Abia y Rodríguez \(2002\)](#) alcanzaron un rendimiento del 70 % en

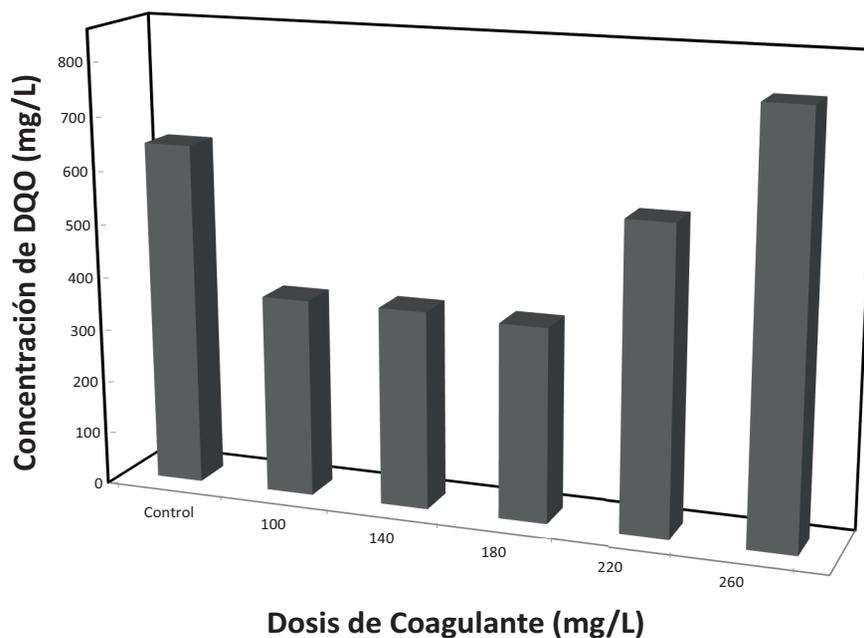


Figura 2. Comportamiento del parámetro *DQO* con el polielectrolito catiónico

Fuente: elaboración propia.

la remoción de la *DQO*.

En la figura 3 se observa la capacidad de remoción de *SST* que posee el coagulante, donde la mayor remoción de este parámetro se presentó al dosificar 140 mg/l del coagulante, arrojando luego del proceso de sedimentación, una disminución de la concentración de *SST* a un valor de 21 mg/l, lo que indica una remoción del 89 % en comparación a la concentración inicial de la muestra (195 mg/l).

La jarra control luego del proceso de sedimentación arrojó una concentración de 99 mg/l de *SST*, que corresponde a una remoción del 49 %, al no dosificársele coagulante, este comportamiento se debe a la acción desestabilizante que ejerce el proceso hidráulico de mezcla sobre las partículas en suspensión, permitiendo una decantación natural de estas partículas en el agua.

Después de la simulación en el test de jarras con el polielectrolito catiónico comercial como coagulante para el rango de dosificación de 100, 140, 180, 220 y 260 mg/l, se obtuvieron remociones de turbidez entre 34 % y 90 %, siendo la jarra con la dosis de 140 mg/l la que presentó la mejor remoción con un valor de 90 % (17 NTU de turbidez) en comparación a la muestra, que tuvo una concentración de 165 NTU de turbidez. De igual forma superó en un 55 % la concentración registrada por el

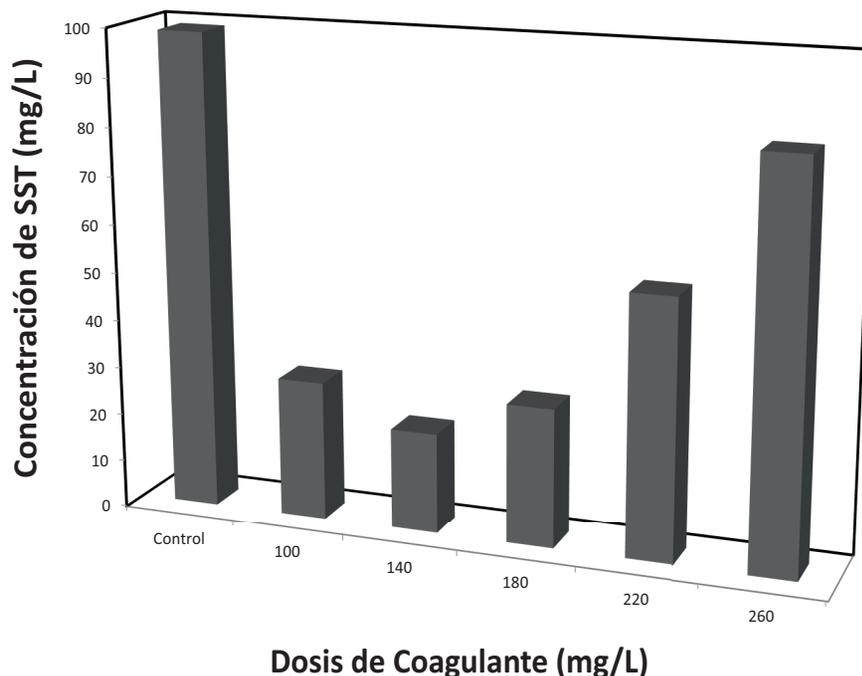


Figura 3. Comportamiento del parámetro SST con el polielectrolito catiónico

Fuente: elaboración propia.

control que fue de 108 NTU (34% de remoción), como lo indica la figura 4, el comportamiento de las concentraciones de turbidez durante la aplicación de polielectrolito catiónico.

Conclusiones

Las ARIL, entre sus características se destaca la presencia de altas concentraciones de materia orgánica representada por una demanda química de oxígeno (DQO) de 800 mg/l; sólidos suspendidos totales (SST) 195 mg/l; aceites y grasas (A y G) de 41 mg/l; sin embargo, el valor promedio de pH de 9,1 facilita las condiciones para que se den las funciones biológicas de descomposición de la materia orgánica.

El polielectrolito catiónico objeto de esta investigación durante el desarrollo de los montajes de simulación de prueba de jarras (coagulación, floculación y sedimentación) para las ARIL, presentó como su mejor concentración de dosificación a 140 mg/l, removiendo valores de A y G, DQO, SST y turbidez de 62 %, 57 % 89 % y 90 %, respectivamente. Esta opción permite mejorar la eficiencia en

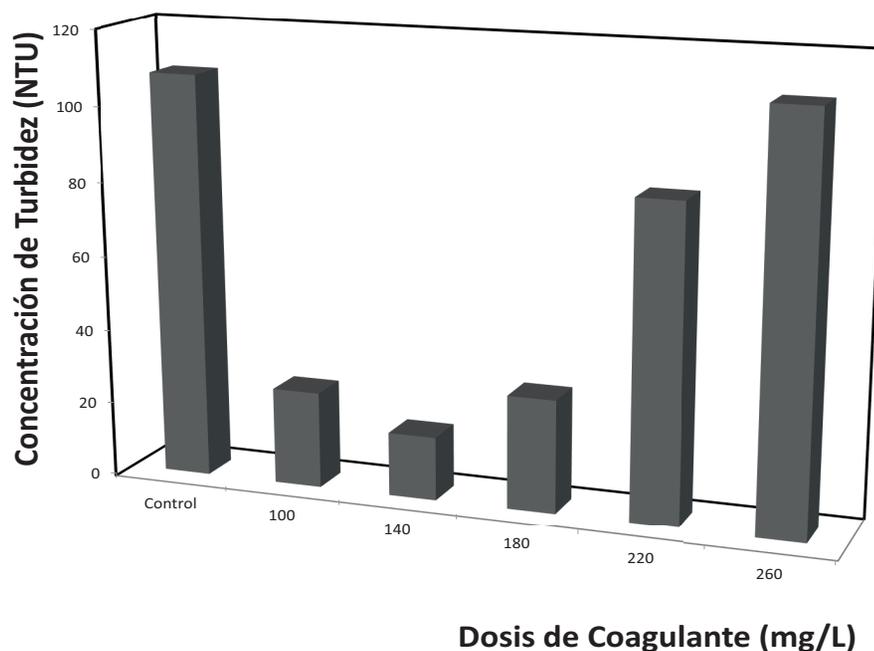


Figura 4. Comportamiento del parámetro *turbidez* con el polielectrolito catiónico

Fuente: elaboración propia.

el proceso de separación de A y G y materia orgánica en el tratamiento de las aguas residuales de la industria láctea.

Financiamiento

Se desarrolló en el marco del convenio institucional entre la Universidad Popular del Cesar, sede Valledupar, y la industria láctea Dairy Partners Americas (DPA) Colombia Ltda.

Referencias

Abía, L. y Rodríguez, M. (2002) Tratamiento fisicoquímico de aguas residuales de las industrias lácteas. *Ingeniería Química*, 391, 100-104. ↑[Ver página 122, 126](#)

American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) y Waste-

- water Treatment Plant Design (WTPD) (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Ediciones Díaz y Santos. ↑Ver página 124
- Arango Ruiz, A. y Garcés Giraldo, L. F. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad Eafit*, 43(147), 56-67. ↑Ver página 123
- Benavides Camacho, I., López Ortiz, N., Restrepo Sánchez, L. y Novoa Castro, C. (2006). Influencia de la bacteria *pseudomonas fluorescens* sobre las características fisicoquímicas y sensoriales del yogurt. *Tecnura*, 10(19), 57-64. DOI: 10.14483/22487638.6231 ↑Ver página 121
- De Sena, R., Moreira, R. y José, H. (2008). Comparison of coagulation aids for treatment of meat processing wastewater by column flotation. *Bioresource Technology*, 99(17), 8221-8225. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.014> ↑Ver página 122
- Flórez Ramos, D. F., Barco Burgos, J. y Rincón Prat, S. L. (2016). Análisis comparativo de la carbonización de cuesco de palma de aceite en reactores de lecho fijo. *Tecnura*, 20(49), 45-58. DOI <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a03> ↑Ver página 124
- García Ubaque, C., García Vaca, M. y Vaca Bohórquez, M. (2013). Encapsulamiento de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria automotriz en matrices de arcilla. *Tecnura*, 17(38), 26-36. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.4.a02> ↑Ver página 124
- García Vaca, M. C., García Ubaque, C. A. y De Plaza Solórzano, J. S. (2016). Estudio exploratorio del tratamiento de agua de lavado de tintas por método de electrocoagulación/electroflotación. *Tecnura*, 20(47), 107-117. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a09> ↑Ver página 122
- Martínez Navarro, F. (2007). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*. Ediciones de la Universidad de Castilla – La Mancha. ↑Ver página 126
- Rodríguez Miranda, J. P., García Ubaque, C. A. y Pardo Pinzón, J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Tecnura*, 19(46), 149- 164. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a12> ↑Ver página 122



Reciclaje de EAFD a través de la lixiviación selectiva de zinc con soluciones de citrato: comparación con un ácido inorgánico

EAFD Recycling Through Selective Zinc Leaching with Citrate Solutions: Comparison with an Inorganic Acid

Johana Borda ¹, Fabián López ², Robinson Torres ³, Mario Parra ⁴

Fecha de Recepción: 16 de Noviembre de 2020

Fecha de Aceptación: 01 de Abril de 2021

Cómo citar: Borda., J. López., F. Torres., R. y Parra., M. (2021). Reciclaje de EAFD a través de la lixiviación selectiva de zinc con soluciones de citrato: comparación con un ácido inorgánico. *Tecnura*, 25(69), 131-149. <https://doi.org/10.14483/22487638.15767>

Resumen

Contexto: Los polvos de acería (*electric arc furnace dust*, EAFD), son una fuente potencial de contaminación, principalmente por los metales pesados y fácilmente lixiviables que pueden contener (Pb, Zn y Cd). Sin embargo, también despiertan un gran interés en el desarrollo de técnicas para su tratamiento, debido al valor agregado que les da su alto contenido de zinc. A pesar de que se han implementado algunos métodos para su reciclaje, estos se caracterizan por demandar gran consumo de energía y operar a condiciones extremas. Por tanto, en este trabajo se presenta una alternativa con enfoque técnico para reciclar los EAFD de manera segura, mediante la extracción selectiva de zinc por vía hidrometalúrgica, permitiendo la obtención de un licor rico en zinc para su posterior recuperación y futura aplicación y un sólido detoxificado rico en hierro, para su recirculación en procesos siderúrgicos.

Métodología: Los experimentos se realizaron a través de lixivitaciones por agitación empleando soluciones de citrato de sodio y ácido nítrico a concentración y agitación moderadas, temperatura y presión ambiente. Algunas de las variables de estudio fueron modificadas a fin de establecer las mejores condiciones para el proceso.

Resultados: Luego de realizar una correlación de resultados y análisis de variables, se determinó que es posible alcanzar extracciones por encima del 50 % de Zn y por debajo del 3 % de Fe con el citrato. Además, que una concentración de 0,5 M y proporción S/L de 25 g / 1 l son algunas de las condiciones más favorables para el proceso de extracción.

Conclusiones: Es posible un aprovechamiento del residuo EAFD mediante ruta hidrometalúrgica, empleando un agente orgánico como solución lixiviante. A diferencia del tratamiento con ácido nítrico, la lixiviación con citrato permite extraer selectivamente el metal de interés a condiciones de trabajo moderadas.

Financiamiento: Vicerrectoría de Investigación y Extensión - Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (VIE-UPTC).

Palabras clave: citrato, EAFD, lixiviación, ácido nítrico, zinc.

¹Ingeniera metalúrgica, magíster en Metalurgia y Ciencia de los Materiales. Estudiante Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia. Email: angelajohana.borda@uptc.edu.co

²Ingeniero metalúrgico. Estudiante Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia. Email: fabians-tiven.lopez@uptc.edu.co

³Ingeniero metalúrgico, magíster en Metalurgia y Ciencia de los Materiales, doctor en Ingeniería Química. Docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia. Email: robinson.torres@uptc.edu.co

⁴Ingeniero metalúrgico, magíster en Metalurgia. Docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia. Email: mario.parra@uptc.edu.co

Abstract

Context: Electric arc furnace dust (EAFD) is a potential source of contamination, mainly due to heavy and easily leachable metals that it can contain (Pb, Zn, and Cd). However, EAFD also arouses great interest in the development of techniques for its treatment due to the added value that its high zinc content gives it. Although some recycling methods have been implemented, they are characterized by demanding high energy consumption and operating in extreme conditions. Therefore in this work, an alternative with a technical approach is presented to safely recycle EAFD through the selective extraction of zinc by hydrometallurgy obtaining, a liquor rich in zinc for its subsequent recovery and future application and a detoxified solid rich in iron for its recirculation in steel processes.

Methodology: The experiments were carried out through agitation leaching using sodium citrate and nitric acid solutions. They were worked at moderate concentrations and stirring speeds and ambient pressure and temperature. Some of the study variables were modified to establish the best conditions for the process.

Results: After making a correlation about the obtained results and the analysis of the variables, it was determined that it is possible to achieve extractions above 50 % of Zn and below 3 % of Fe with citrate solutions. Furthermore, a concentration of 0.5 M and an S: L ratio of 25g / 1 L are some of the most favorable conditions for the extraction process.

Conclusions: It is possible to properly treat the EAFD residue by a hydrometallurgical route using an organic agent as a leaching solution. Unlike nitric acid treatment, citrate leaching allows the metal of interest to be selectively extracted under moderate working conditions.

Financing: Vicerrectoría de Investigación y Extensión – Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (VIE-UPTC).

Keywords: citrate, EAFD, leaching, nitric acid, zinc.

Tabla de Contenidos

	Página
Introducción	133
Metodología	135
Caracterización de la muestra	135
Soluciones de lixiviación	135
Resultados	136
Caracterización de la muestra	136
Lixiviación con citrato de sodio	136
Efecto pH	136
Efecto de la proporción sólido/líquido (s/l)	140
Efecto de la adición de hidracina	141
Lixiviación con citrato en comparación con HNO ₃	142
Efecto de la concentración de reactivos	143
Efecto de la velocidad de agitación	144

Conclusiones	145
Financiamiento	146
Agradecimientos	146
Referencias	146

Introducción

Dentro de los principales problemas que presenta la industria siderúrgica en todo el mundo, se encuentran la disposición y tratamiento de los desechos que esta produce. El horno de arco eléctrico, por ejemplo, genera los polvos de acería (*electric arc furnace dust*, EAFD) como resultado de sus procesos de fusión y afino. Estos se caracterizan por tener una composición química variable y heterogénea que depende directamente de las características de la carga metálica utilizada y las condiciones del proceso (Siame *et al.*, 2019). No obstante, son comunes metales pesados susceptibles de ser lixiviados como plomo y cadmio en su composición, por lo que se les ha llegado a catalogar como un tipo de residuo peligroso (Hagni *et al.*, 1991, Castells, 2000, Bruckard *et al.*, 2005).

Se estima que a nivel mundial la industria siderúrgica genera un poco más de 5 millones o 7 millones de toneladas de EAFD al año (Machado *et al.*, 2006). La preocupación con respecto a su generación radica en que en muchos casos las industrias optan por depositarlos en patios de acopio o vertederos expuestos a la atmosfera, a la espera de la implementación de un enfoque técnico para tratarlos o reciclarlos de manera segura (Siame *et al.*, 2019). La composición misma del material permite una recirculación en el interior de la planta, puesto que su contenido de hierro es considerable. Sin embargo, no se han trazado estrategias novedosas para recuperar el zinc.

Recientemente se han enfocado esfuerzos en recuperar metales desde distintos tipos de residuos (electrónicos, industriales, etc.), para minimizar el impacto ambiental generado durante la obtención de materias primas en procesos metalúrgicos tradicionales (Torres y Lapidus, 2016, Hong *et al.*, 2015, Klemeš *et al.*, 2019); además, resulta ser una alternativa tecnológicamente interesante, debido al consumo de las reservas minerales. En el caso particular del zinc en los residuos EAFD se conocen estudios piro- e hidrometalúrgicos. El *sistema Waelz* (Alemania) se caracteriza por la volatilización de metales como Zn, Pb y Cd a partir de una mezcla de óxidos sólidos, por medio de la reducción con coque en un horno rotatorio (Madias, 2009). Sin embargo, este proceso presenta desventajas como la dificultad en la regulación de la temperatura, la composición de la carga, las pérdidas irreversibles de hierro al alcanzar el 50 % de óxidos en la escoria (Doronin y Svyazhin, 2011, Madias, 2009) y la generación significativa de residuos, ya que no pueden recuperarse algunos metales presentes, como el cobre y el níquel, los cuales permanecen en las escorias (Walburga Keglevich de Buzin *et al.*, 2017). El reciclaje directo de EAFD al horno de arco eléctrico causa muchos problemas operativos, como la

falla del refractario y el llenado completo de la extracción de gas (Walburga Keglevich de Buzin *et al.*, 2017).

A pesar de la funcionalidad del proceso de fusión, es evidente el considerable gasto energético por cada kilogramo del metal no ferroso recuperado. La incorporación de los polvos de acería en otros procesos o productos también se ha reportado como método de tratamiento del residuo; los EAFD se han empleado como materia prima secundaria en la producción de morteros autocompactantes (Lozano *et al.*, 2019a, Lozano *et al.*, 2019b) y en las pastas de cemento Portland I modificadas con Pozzolan (De Vargas *et al.*, 2006), entre otros; sin embargo, a pesar de su uso como forma de tratamiento de residuos industriales, trabajos previos han demostrado que la incorporación de materiales reciclados a los compuestos cementicios conduce a un deterioro en su comportamiento físico y mecánico resistente (Xargay *et al.*, 2019, Palacio-León *et al.*, 2017, Robayo-Salazar *et al.*, 2015), requiriendo una vigilancia constante tanto en el proceso como en los productos fabricados.

En las rutas hidrometalúrgicas existen estudios donde se emplean ácidos inorgánicos convencionales y otros alternativos (ácido acético y tartárico) (De la Torre *et al.*, 2013). Se han reportado, por ejemplo, recuperaciones de zinc superiores al 70% empleando soluciones 6 M de NaOH a 90 °C (Dutra *et al.*, 2006), mientras que el H₂SO₄ ha alcanzado extracciones máximas del 80% a 1,5 M y 60 °C (Oustadakis *et al.*, 2010). La desventaja de estos procesos consiste en las extremas condiciones de operación, además, de que algunos reactivos utilizados se clasifican como tóxicos y corrosivos; sin embargo, el principal inconveniente es la nula selectividad del proceso. Como se indicó anteriormente, los metales contenidos dependen del tipo de carga que se emplee en el horno. No obstante, al tratarse de procesos siderúrgicos, el contenido de hierro en la mayoría de casos es elevado. De esta forma, si durante el proceso de lixiviación no se cuenta con algún tipo de selectividad, se tendrán serias dificultades durante las etapas posteriores de electrorrecuperación de cada metal (Torres y Lapidus, 2017).

En estudios anteriores se ha demostrado que las soluciones basadas en citrato de sodio (Na₃C₆H₅O₇·2H₂O) tienen la capacidad de adquirir características de selectividad para determinados metales dependiendo del pH (Torres y Lapidus, 2016). Adicionalmente, este tipo de soluciones lixiviantes poseen la capacidad de ser reutilizadas en varios ciclos de lixiviación/electrorrecuperación, sin perjuicio considerable en su capacidad de disolución de metales (Torres y Lapidus, 2017). De esta forma, el presente estudio tiene como objetivo proponer una ruta selectiva de lixiviación para recuperar el zinc contenido en los EAFD, empleando soluciones reutilizables de citrato que minimicen el potencial impacto ambiental de estos residuos. Se varió la concentración de reactivo y la velocidad de agitación para analizar su comportamiento en el sistema. Los resultados se confrontaron con los encontrados utilizando soluciones de HNO₃ bajo las mismas condiciones, para establecer comparación entre el agente orgánico propuesto y un inorgánico convencional.

Metodología

Caracterización de la muestra

El estudio se realizó utilizando EAFD recolectado de una planta colombiana con un horno eléctrico que procesa acero a partir de chatarra. La concentración y el análisis elemental se determinaron mediante digestión química con agua regia (HCl: HNO₃, 3:1).

Los compuestos que se ajustan al EAFD se determinaron mediante la técnica de difracción de rayos X (DRX) en el equipo Panalytical X'pert Pro, que utiliza geometría Bragg-Brentano con tubo de cobalto; las muestras se analizaron con la base de datos ICDD® (International Center for Diffraction Data).

La clasificación granulométrica EAFD se determinó por vía seca utilizando tamices de la serie ASTM-E-11. Las características magnéticas de la muestra generaron aglomeraciones durante el proceso. Para reducir el riesgo de adhesión entre partículas, fueron necesarias pruebas de tamizaje en húmedo. De esta forma, se obtuvo el análisis de tamaño de grano más preciso.

Soluciones de lixiviación

Se prepararon soluciones de lixiviación usando agua desionizada y citrato de sodio de grado analítico. Las concentraciones molares fueron específicas para cada experimento. El pH se ajustó con una solución diluida de HNO₃ (J.T. Baker®). Teórica y experimentalmente se verificó que la química del proceso no se viera afectada por el ajuste (datos no incluidos). El proceso de lixiviación se llevó a cabo a temperaturas entre 15-17 °C. Se utilizaron diferentes proporciones sólido/líquido. Se tomaron alícuotas en momentos específicos para evaluar el comportamiento y la evolución de la lixiviación. En algunos de los experimentos, se añadió hidracina durante cada hora del proceso, para verificar su efecto sobre la velocidad de reacción. Se emplearon agitadores mecánicos tipo paleta, sin baffles (Model 50006-03 - COLE-PARMER). El potencial de las soluciones fue monitorizado empleando un electrodo de Ag/AgCl saturado (Oakton pH ORP 700 Benchtop Meter); posteriormente, los valores fueron ajustados al electrodo estándar de hidrógeno (SHE). Todos los diagramas de áreas predominantes se realizaron utilizando el *software* MEDUSA® (Eriksson, 1979, Puigdomenech, 2004). Los datos termodinámicos correspondientes se contrastaron con la base de datos NIST 46 (NIST, 2004).

Los contenidos metálicos de todas las muestras se cuantificaron con el espectrómetro de emisión atómica de plasma por microondas (Agilent 4210 MP-AES), utilizando estándares y parámetros analíticos establecidos por el fabricante.

Resultados

Caracterización de la muestra

El EAFD está compuesto principalmente de hierro y zinc (tabla 1). El alto contenido de zinc resulta atractivo, considerando que el valor asociado a la recuperación de este metal contribuye significativamente a la viabilidad económica del proceso (Walburga Keglevich de Buzin *et al.*, 2017).

Tabla 1. Contenido de metales pesados de EAFD

Elemento	Cu	Pb	Fe	Zn
Contenido (%)	0,219	1,660	31,610	24,682

Fuente: elaboración propia.

El patrón de difracción de rayos X se muestra en la figura 1. Las fases predominantes de EAFD son óxidos mixtos con estructura de espinela normal ($ZnFe_2O_4$ y Fe_3O_4) y óxidos de hierro y zinc (Fe_2O_3 , ZnO). También se encuentran presentes óxidos de plomo, cobre y silicio, pero en menores cantidades (PbO , Cu_2O y SiO_2).

La composición de esta muestra EAFD concuerda con los hallazgos de otros autores (Hagni *et al.*, 1991, Simonyan *et al.*, 2019).

El estudio de clasificación granulométrica evidenció que la sustancia tiene un tamaño de partícula distribuido de manera homogénea (tabla 2); es decir, la granulometría del EAFD no tiene efecto sobre la composición del lote de muestra; por consiguiente, no fue necesario seleccionar tamaños de partícula específicos para el desarrollo experimental.

Tabla 2. Determinación granulométrica de EAFD

Abertura (μm)	425	250	150	106	75	63	Fondo	Total
Peso retenido (%)	15,92	12,29	17,22	12,39	14,77	10,84	16,57	100

Fuente: elaboración propia.

Lixiviación con citrato de sodio

Efecto pH

Para determinar el área de estabilidad de los metales determinados en la composición del residuo en soluciones de citrato, fue necesario hacer un análisis termodinámico. La información proporcio-

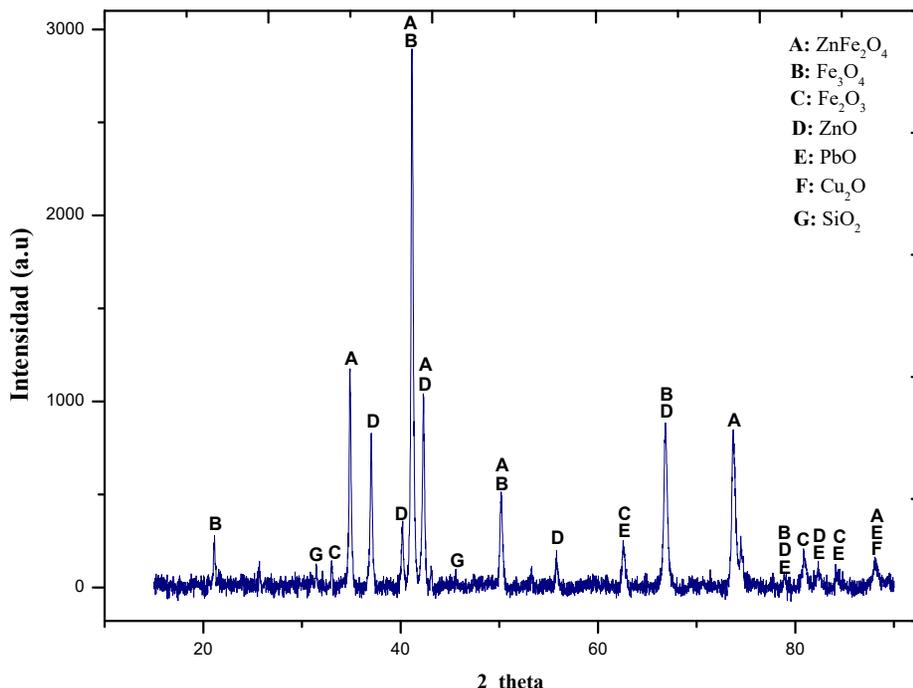


Figura 1. Difractograma de EAFD

Fuente: elaboración propia.

nada por los diagramas de predominio (figura 2) permitió ubicar las condiciones termodinámicas favorables para la lixiviación de los metales de estudio.

El citrato forma complejos solubles con los iones metálicos según el pH y los potenciales de solución. El potencial del sistema M-Cit fue de 370 a 490 mV. Sin embargo, el análisis termodinámico de metales muestra que la formación de complejos está limitada por el pH y no por el potencial. Por tanto, el potencial de solución no se discute en este estudio. El área de estabilidad del zinc está en el rango de pH de 1 a 10,5; sin embargo, los otros metales también tienen una amplia gama de formación de especies solubles. Para verificar el efecto de las soluciones en condiciones básicas, neutras y ácidas, se realizaron experimentos variando el pH en 3,0; 6,0 y 9,0 (figura 3).

Las pruebas de lixiviación fueron favorables a pH 3 y 6, aunque la superioridad del pH ácido fue del 12%. Mientras tanto, en condiciones alcalinas, el citrato solo logró disolver el 10% del zinc. La formación de complejos a partir del ligando orgánico Cit³⁻ y el catión divalente Zn⁺², depende del pH.

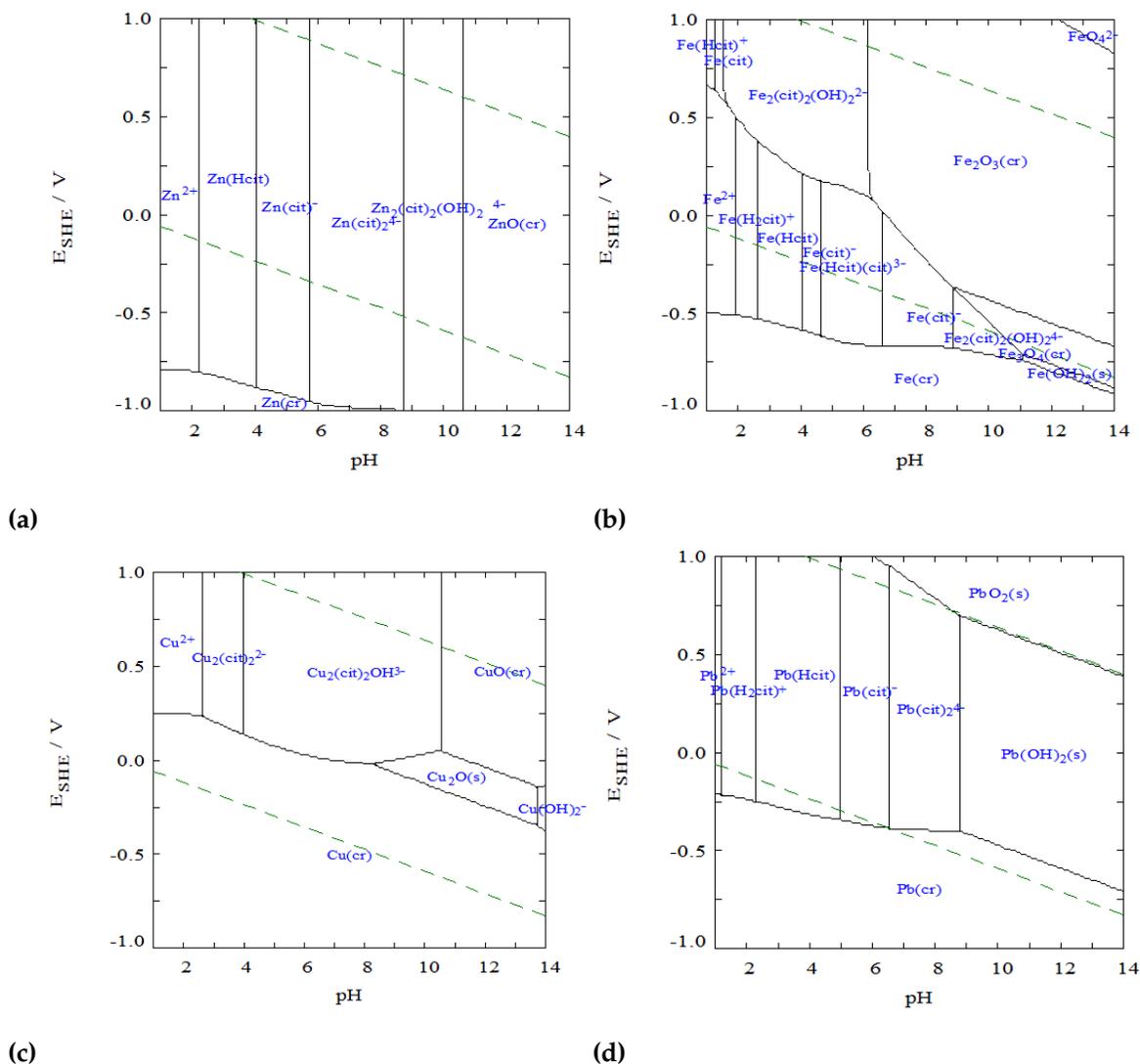


Figura 2. Diagramas de predominio para zinc (a), hierro (b), cobre (c) y plomo (d) en presencia de citrato 0,5 M. Diseñado con el *software* MEDUSA

Fuente: elaboración propia.

Según los datos termodinámicos, el sistema se ve favorecido por la presencia del ion hidronio, alcanzando el estado energético más estable a pH 3 (tabla 3; ecuaciones (1), (5) y (9)).

Por tanto, la disolución de zinc en estado oxidado se beneficia en medios ácidos. Los resultados son prometedores en cuanto a la baja disolución de hierro que alcanza el citrato (<3 %) al 3 pH trabajado. El citrato muestra su capacidad selectiva para no disolver óxidos de hierro (figura 3). Su energía libre denota que son inestables y menos espontáneos que los formados por zinc (tabla 3, ecuaciones

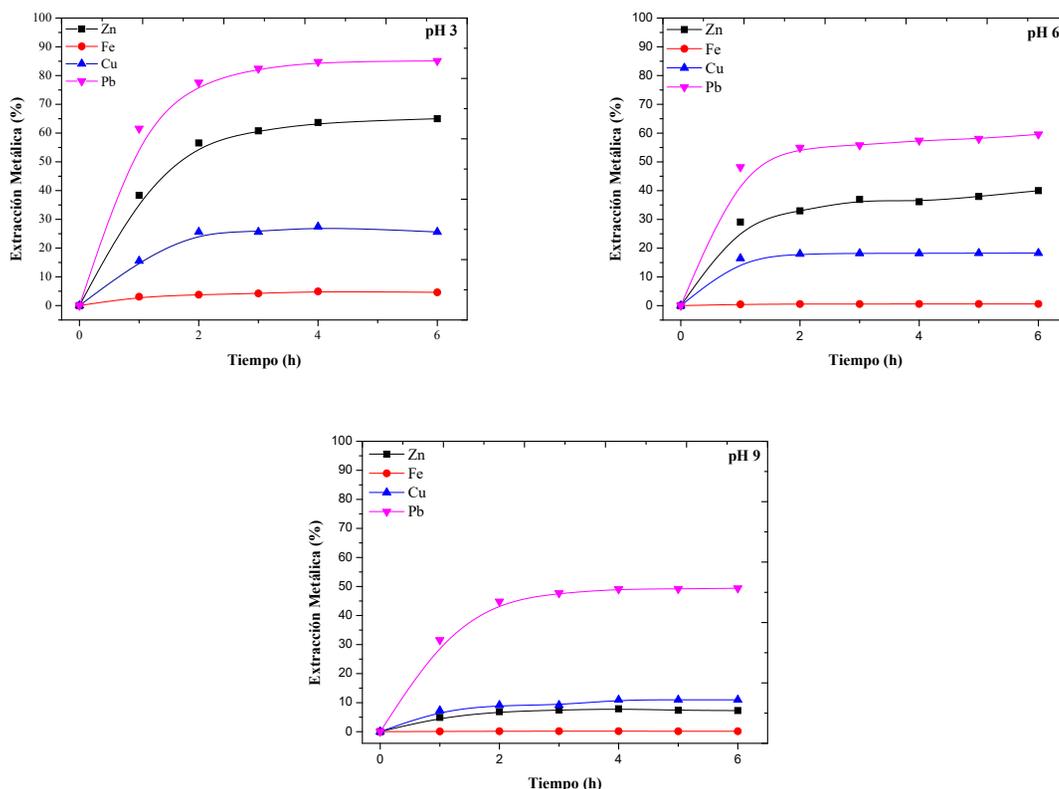


Figura 3. Efecto del pH sobre la extracción de metales contenidos en EAFD. Condiciones: citrato de sodio 0,5 M a pH 3, pH 6 y pH 9; 500 r. p. m.; 25 g EAFD/l

Fuente: elaboración propia.

(4), (4) y (12)). Adicionalmente, en el estudio de difracción de rayos X (figura 1) se encontró que el hierro corresponde principalmente a una especie cristalina bastante estable (Carriazo Baños *et al.*, 2017) y poco soluble ($\text{Fe}_3\text{O}_{\text{HNO}}$) que no se degrada en la lixiviación.

Termodinámicamente, tanto el cobre como el plomo tienen condiciones de pH favorables para la disolución (figura 2c-d). Pero, debido a su baja concentración en el EAFD y su modesta extracción (figura 2), el cobre no se tuvo en cuenta en el presente estudio. Para asegurar la lixiviación selectiva de zinc, se añadió el anión SO_2^{-4} como ligando. Estas moléculas forman una especie insoluble con el plomo e inhiben su disolución. A pesar de variar la concentración de ligando, los resultados no fueron los esperados (datos no incluidos), ya que la disolución de Pb en citrato tuvo lugar en el proceso. Una posible solución a esto es realizar posteriores tratamientos de cementación o precipitación del plomo; sin embargo, estas pruebas están fuera del alcance de este estudio.

Tabla 3. Datos termoquímicos para el producto de reacción de la lixiviación de Zn, Cu, Pb y Fe

pH	Reacción	Delta G
3	$Zn^{2+} + H^+ + Cit^{3-} = Zn(HCit)$ (1)	-13991,2
	$2Cu^{2+} + 2Cit^{3-} = Cu_2(Cit)_2^{2-}$ (2)	-23550,5
	$Pb^{2+} + H^+ + Cit^{3-} = Pb(HCit)$ (3)	-15286,7
	$2Fe^{3+} + 2Cit^{3-} = 2H^+ + Fe_2(Cit)_2(OH)_2^{2-}$ (4)	2045,5
6	$Zn^{2+} + 2Cit^{3-} = Zn(Cit)_2^{4-}$ (5)	-10186,6
	$2Cu^{2+} + 2Cit^{3-} = H^+ + Cu_2(Cit)_2OH^{3-}$ (6)	-18136,76
	$Pb^{2+} + Cit^{3-} = Pb(Cit)^-$ (7)	-8550,2
	$2Fe^{3+} + 2Cit^{3-} = 2H^+ + Fe_2(Cit)_2(OH)_2^{2-}$ (8)	2045,5
	$2Zn^{2+} + 2Cit^{3-} = 2H^+ + Zn_2(Cit)_2(OH)_2^{4-}$ (9)	2740,97
9	$2Cu^{2+} + 2Cit^{3-} = H^+ + Cu_2(Cit)_2OH^{3-}$ (10)	-18136,76
	$Pb^{2+} = 2H^+ + Pb(OH)_2 (s)$ (11)	11113,9
	$2Fe^{2+} = 6H^+ + 2e^- + Fe_2O_3$ (12)	36066,2

Fuente: (Puigdomenech, 2004) y (NIST, 2004).

Efecto de la proporción sólido/líquido (s/l)

El efecto de la variación en la proporción s/l sobre la disolución de zinc en solución de citrato se muestra en la figura 4. Como se esperaba, la eficiencia de lixiviación de zinc disminuyó con la relación más alta probada (C). La saturación de la solución o la limitación estequiométrica del citrato inhibió la disolución completa de los metales contenidos en la muestra.

La proporción de 12,5 g/l (A) muestra disoluciones favorables; sin embargo, la mayor extracción se alcanza con la proporción de 25 g/l (B). La diferencia entre estos ensayos no es significativa ni proporcional; además, a nivel industrial, no resulta eficiente procesar pocas cantidades de material en las

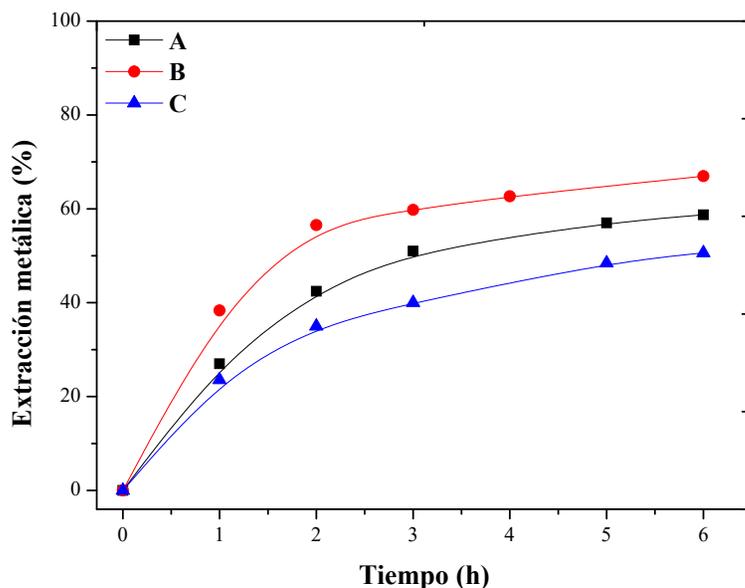


Figura 4. Influencia de la relación S/L en el comportamiento de lixiviación del zinc de EAFD. Condiciones: (A) 12,5, (B) 25 y (C) 50 g/L. Citrato 0,5 M, pH 3; 500 r. p. m.

Fuente: elaboración propia.

operaciones metalúrgicas, debido a que la cantidad de reactivo empleado tiende a desaprovecharse, por consiguiente, la relación s/l más adecuada para el tratamiento de EAFD es de 25 g/l.

Efecto de la adición de hidracina

Las pruebas preliminares indicaron que la extracción máxima de zinc es aproximadamente del 60% en la tercera hora de lixiviación. Pasado este tiempo, la extracción es insignificante. En la mayoría de los procesos hidrometalúrgicos se requieren oxidantes fuertes para incrementar las extracciones (Córdoba *et al.*, 2008), sin embargo, entre los componentes del EAFD (figura 1), solo el Fe_2O_3 podría oxidarse. Por tanto, se puede anticipar que la adición de estos agentes tiene poco efecto sobre el aumento de la lixiviación de zinc. La zincita (ZnO) y franklinita (ZnFe_2O_4), son las fases en las que se encuentra contenido el metal no ferroso en el residuo; la lixiviación de ZnO es posible en medios alcalinos o ácidos (Chairaksa *et al.*, 2016), pero la situación del ZnFe_2O_4 es diferente. Su estabilidad requiere condiciones termodinámicas más drásticas para su descomposición (Zhang *et al.*, 2011), por ende, se añadió hidracina (N_2H_4) 0,1 M durante la lixiviación con el objeto de reducir el hierro de la ferrita ($\text{Fe}^{+3} \rightarrow \text{Fe}^{+2}$) y así liberar y extraer los iones zinc. Los resultados se muestran en la figura 5.

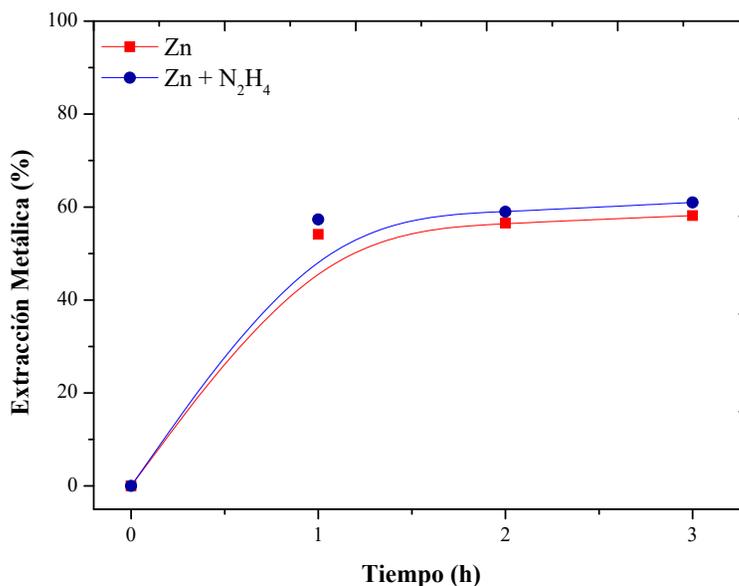


Figura 5. Efecto de la adición de hidracina. Condiciones: Citrato de sodio a pH 3 y 0,5 M; 500 r. p. m.; 25 g EAFD/1

Fuente: elaboración propia.

La acción del N_2H_4 no es suficiente para mejorar el proceso de recuperación. Posiblemente la descomposición de $ZnFe_2O_4$ se centre en procesos pirometalúrgicos (Yang *et al.*, 2011, Chairaksa-Fujimoto *et al.*, 2016). Por tanto, está claro que independientemente de si se utilizan agentes oxidantes o reductores, la espinela es muy difícil de disolver químicamente en soluciones acuosas para mejorar la extracción de zinc.

Los resultados no muestran la importancia y la necesidad de continuar lixivando después de la tercera hora.

Lixiviación con citrato en comparación con HNO_3

Los iones de nitrato permiten la formación de especies metálicas con una solubilidad moderada permitiendo un 48 % de extracción de zinc. Sin embargo, los óxidos de hierro también son ligeramente estables en medios de nitrato y alcanzan aproximadamente el 10 % de extracción (figura 6). Este contenido de hierro disuelto requiere un proceso de purificación de licor. La extracción de zinc con citrato fue superior a la obtenida con HNO_3 . Además, el citrato es más selectivo, ya que logró disolver menores cantidades de hierro. Sin embargo, el comportamiento de las curvas es similar para

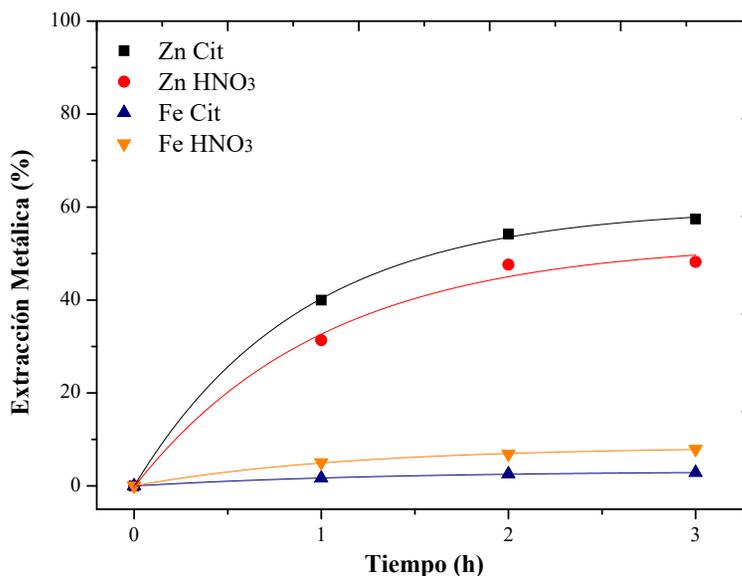


Figura 6. Lixiviación con citrato vs. HNO₃. Condiciones: citrato y HNO₃ 0,5 M; 500 r. p. m.; 25 g EAFD/1

Fuente: elaboración propia.

ambos agentes. Ambos sistemas exhiben una tasa de extracción rápida debido a la alta solubilidad de ZnO y al pequeño tamaño de las partículas de EAFD (Nagib e Inoue, 2000).

Efecto de la concentración de reactivos

Se estudió el efecto de la concentración de reactivos sobre la velocidad de reacción de la lixiviación. Se puede ver que la eficiencia de la extracción de zinc aumenta ligeramente al aumentar la concentración de reactivos (figura 7).

Sin embargo, al duplicar la concentración de reactivo, la extracción mejora en un 8 % en el mejor de los casos. Esta falta de proporcionalidad indica que la concentración es aparentemente independiente de la recuperación del metal.

Las reacciones de los sistemas M-Cit y M-HNO₃ muestran el comportamiento descrito de las reacciones de pseudo primer orden: la cinética no revela una velocidad de reacción constante, ni dependencia alguna de rapidez respecto a la concentración de los reactivos (Avery, 1974). En el caso del hierro, la concentración tiene un efecto mayor sobre el HNO₃ que sobre el citrato; sin embargo, el incremento en la extracción es solo del 2 %.

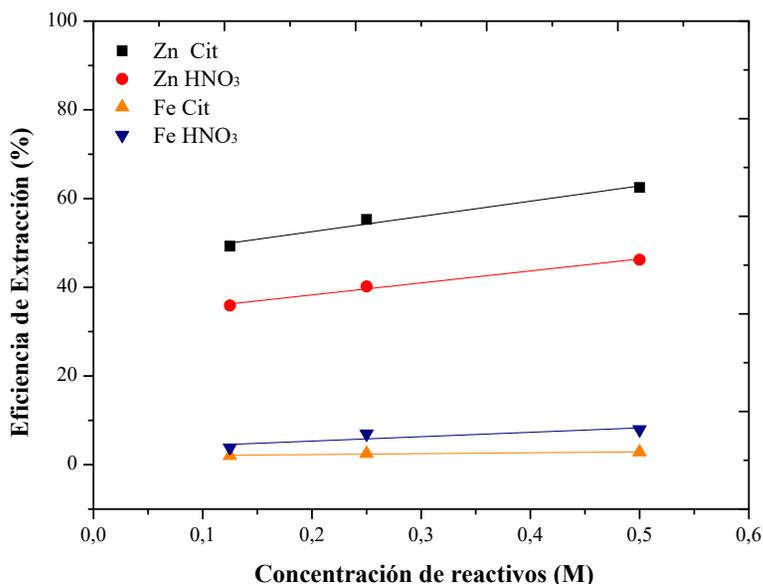


Figura 7. Efecto de la concentración de reactivos sobre la eficiencia de extracción de Zn y Fe. Condiciones: citrato de sodio y HNO₃ a 0,125; 0,25 y 0,5 M; 0,5 M; 500 r. p. m.; 25 g EAFD/l

Fuente: elaboración propia.

Efecto de la velocidad de agitación

Se varió la agitación a 125, 250 y 500 r. p. m., para verificar el efecto del grado de suspensión de los sólidos en la solución. Ambos reactivos tienen un comportamiento similar. Los resultados muestran que la extracción de zinc aumenta ligeramente al aumentar la velocidad de agitación (figura 8). No obstante, el aumento entre estas agitaciones es de menos del 10 % para ambos reactivos; la extracción de hierro, por su parte, no se vio afectada. Al no ser significativos ni proporcionales los aumentos de extracción con la variación de la agitación, se descartan posibles efectos de transferencia de masa. Por tanto, para este estudio la agitación no tiene efecto aparente sobre la cinética de reacción.

Debido al comportamiento de las curvas de extracción, se puede predecir el modelo de control del sistema de lixiviación. La reacción química puede tener lugar rápidamente en la interfaz entre el sólido y el producto de reacción (figura 8), desplazándose hasta el interior de la partícula formando un núcleo de material sin reaccionar (ferritas), dejando en su lugar una capa porosa de sólidos inertes (Levenspiel, 1999). Esto se refleja con el comportamiento de la curva de extracción de zinc, inicialmente, con una elevada pendiente, seguido de un comportamiento asintótico adoptado luego de la primera hora; probablemente la especie ZnO, presenta una lixiviación espontánea, agotándose

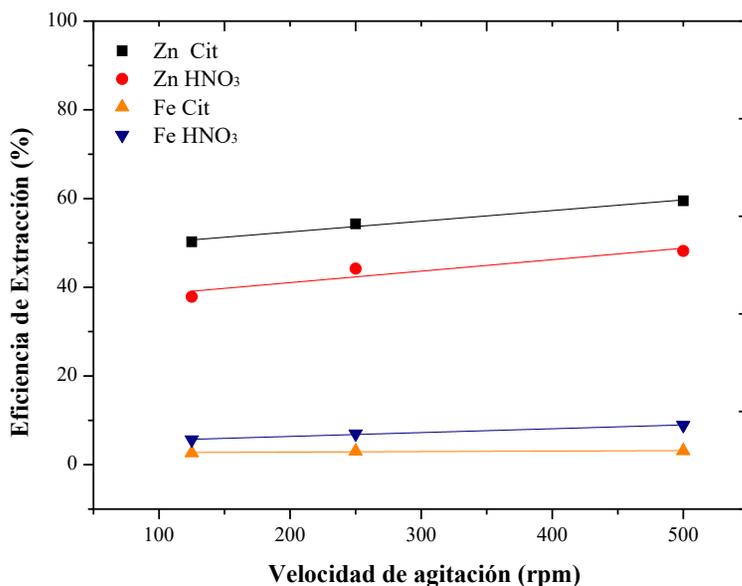


Figura 8. Efecto de la velocidad de agitación sobre la eficiencia de extracción de Zn y Fe. Condiciones: citrato de sodio y HNO₃ 0,5 M; 125; 250 y 500 r. p. m.; 25 g EAFD/l

Fuente: elaboración propia.

rápidamente y quedándose sin disolver, la fase de la ferrita ZnFe₂O₄.

Los criterios específicos de la cinética del proceso se escapan del alcance de este estudio y están en proceso de publicación por los autores.

Conclusiones

Las soluciones de citrato proporcionaron una alta selectividad hacia el zinc, ya que solo menos del 3% de hierro se extrajo de los residuos.

La presencia de franklinita no permite lixiviar el total de zinc presente en EAFD, ya que su estabilidad evita su disolución química en soluciones acuosas.

La adición de ligandos SO₄²⁻ en el proceso no es eficaz para inhibir la disolución del plomo en la solución de citrato; se recomiendan tratamientos poslixiviación para la extracción selectiva de zinc.

La lixiviación con citrato presentó mejores resultados que el HNO₃. Extrae más zinc, logra una lixiviación selectiva y resulta más ecológico, al ser orgánico y contar con la posibilidad de reutilizarse en nuevos procesos de lixiviación.

De acuerdo con el análisis de resultados experimentales en el proceso de lixiviación, se encontró que la mejor extracción de zinc lograda a partir de EAFD se obtiene al realizar el proceso bajo las siguientes condiciones: tres horas de operación; citrato a pH 3 y concentración molar de 0,5; la proporción s/l elegida fue de 25 g / 1 l de solución.

Se recomiendan nuevos estudios, mediante los cuales la modificación de las condiciones aquí estudiadas permitan que el proceso encuentre la optimización y el uso adecuado de este tipo de residuos industriales.

Financiamiento

Vicerrectoría de Investigación y Extensión, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (VIE-UPTC).

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido del proyecto VIE-SGI para la realización de esta investigación, así como del Grupo Metalurgia No Ferrosa de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC.

Referencias

- [Avery, 1974] Avery, H. E. (1974). *Basic reaction kinetics and mechanisms*. Macmillan Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-15520-0> ↑Ver página 143
- [Bruckard *et al.*, 2005] Bruckard, W. J., Davey, K. J., Rodopoulos, T., Woodcock, J. T. e Italiano, J. (2005). Water leaching and magnetic separation for decreasing the chloride level and upgrading the zinc content of EAF steelmaking baghouse dusts. *International Journal of Mineral Processing*, 75(1-2), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.04.007> ↑Ver página 133
- [Carriazo Baños *et al.*, 2017] Carriazo Baños, J. G., Noval Lara, V. E. y Ochoa Puentes, C. (2017). Magnetita (Fe₃O₄): una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea. *Revista Colombiana de Química*, 46(1), 42. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v46n1.62831> ↑Ver página 139
- [Castells, 2000] Castells, X. (2000). *Reciclaje de residuos industriales*. Ediciones Díaz de Santos S.A. ↑Ver página 133

- [Córdoba *et al.*, 2008] Córdoba, E. M., Muñoz, J. A., Blázquez, M. L., González, F. y Ballester, A. (2008). Leaching of chalcopyrite with ferric ion. Part I: General aspects. *Hydrometallurgy*, 93(3-4), 81- 87. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.04.015> ↑Ver página 141
- [Chairaksa-Fujimoto *et al.*, 2016] Chairaksa-Fujimoto, R., Maruyama, K., Miki, T. y Nagasaka, T. (2016). The selective alkaline leaching of zinc oxide from Electric Arc Furnace dust pre-treated with calcium oxide. *Hydrometallurgy*, 159, 120-125. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.11.009> ↑Ver página 142
- [De la Torre *et al.*, 2013] De la Torre, E., Guevara, A. y Espinoza, C. (2013). Valorización de polvos de acería, mediante recuperación de zinc por lixiviación y electrólisis. *Revista Politécnica*, 32(1), 51-56. ↑Ver página 134
- [De Vargas *et al.*, 2006] De Vargas, A. S., Masuero, Â. B., y Vilela, A. C. F. (2006). Investigations on the use of electric-arc furnace dust (EAFD) in Pozzolan-modified Portland cement I (MP) pastes. *Cement and Concrete Research*, 36(10), 1833-1841. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.06.003> ↑Ver página 134
- [Doronin y Svyazhin, 2011] Doronin, I. E. y Svyazhin, A. G. (2011). Commercial methods of recycling dust from steelmaking. *Metallurgist*, 54(9-10), 673-681. <https://doi.org/10.1007/s11015-011-9356-z> ↑Ver página 133
- [Dutra *et al.*, 2006] Dutra, A. J. B., Paiva, P. R. P. y Tavares, L. M. (2006). Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust. *Minerals Engineering*, 19(5), 478-485. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.08.013> ↑Ver página 134
- [Eriksson, 1979] Eriksson, G. (1979). An algorithm for the computation of aqueous multicomponent, multiphase equilibria. *Analytica Chimica Acta*, 112, 375-383. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(01\)85035-2](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(01)85035-2) ↑Ver página 135
- [Hagni *et al.*, 1991] Hagni, A. M., Hagni, R. D. y Demars, C. (1991). Mineralogical characteristics of electric arc furnace dusts. *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 43(4), 28-30. <https://doi.org/10.1007/BF03220543> ↑Ver página 133, 136
- [Hong *et al.*, 2015] Hong, J., Shi, W., Wang, Y., Chen, W. y Li, X. (2015). Life cycle assessment of electronic waste treatment. *Waste Management*, 38, 357-365. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.022> ↑Ver página 133
- [Klemeš *et al.*, 2019] Klemeš, J. J., Stehlík, P. y Worrell, E. (2010). Waste treatment to improve recycling and minimise environmental impact. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(5), 267- 270. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.11.005> ↑Ver página 133

- [Levenspiel, 1999] Levenspiel, O. (1999). *Chemical reaction engineering*. 3a. ed. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1021/ie990488g> ↑Ver página 144
- [Lozano *et al.*, 2019a] Lozano, A., Raposeiro, P., Álvarez, De Brito, J. y Jiménez, J. (2019a). Performance and durability properties of self-compacting mortars with electric arc furnace dust as filler. *Journal of Cleaner Production*, 219, 818-832. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.145> ↑Ver página 134
- [Lozano *et al.*, 2019b] Lozano, A., Raposeiro, P., De Brito, J., Fernández, J. M. y Jiménez, J. R. (2019b). Safe use of electric arc furnace dust as secondary raw material in self-compacting mortars production. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1375-1388. 10.1016/j.jclepro.2018.12.002 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.002> ↑Ver página 134
- [Machado *et al.*, 2006] Machado, J., Brehm, F., Moraes, C., Santos, C., Vilela, A. y Cunha, J. (2006). Chemical, physical, structural and morphological characterization of the electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 953-960. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.01.044> ↑Ver página 133
- [Madias, 2009] Madias, J. (2009). Reciclado de polvos de horno eléctrico. *Acero Latinoamericano*, 23(513), 38. ↑Ver página 133
- [Nagib e Inoue, 2000] Nagib, S. e Inoue, K. (2000). Recovery of lead and zinc from fly ash generated from municipal incineration plants by means of acid and/or alkaline leaching. *Hydrometallurgy*, 56(3), 269-292. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00073-6](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00073-6) ↑Ver página 143
- [NIST, 2004] NIST. (2004). *Critically selected stability constants of metal complexes*. NIST Standard Reference Database 46, Version 8.0. ↑Ver página 135, 140
- [Oustadakis *et al.*, 2010] Oustadakis, P., Tsakiridis, P. E., Katsiapi, A. y Agatzini-Leonardou, S. (2010). Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD). *Journal of Hazardous Materials*, 179(1-3), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.059> ↑Ver página 134
- [Palacio-León *et al.*, 2017] Palacio-León, O., Chávez, A. y Velásquez, Y. (2017). Evaluación y comparación del análisis granulométrico obtenido de agregados naturales y reciclados. *Tecnura*, 21(53), 96- 106. <https://doi.org/10.14483/22487638.8195> ↑Ver página 134
- [Puigdomenech, 2004] Puigdomenech, I. (2004). *HYDRA (Hydrochemical Equilibrium-Constant Database) and MEDUSA (Make Equilibrium Diagrams Using Sophisticated Algorithms) Programs*. Royal Institute of Technology. ↑Ver página 135, 140
- [Robayo-Salazar *et al.*, 2015] Robayo-Salazar, R. A., Matthey-Centeno, P. E., Silva-Urrego, Y. F., Burgos-Galindo, D. M. y Arjona, S. (2015). Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de

- Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento. *Tecnura*, 19(44), 157- 170. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a12> ↑Ver página 134
- [Siame *et al.*, 2019] Siame, M. C., Kaoma, J., Hlabangana, N. y Danha, G. (2019). An attainable region approach for the recovery of iron and zinc from electric arc furnace dust. *South African Journal of Chemical Engineering*, 27, 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.12.002> ↑Ver página 133
- [Simonyan *et al.*, 2019] Simonyan, L. M., Alpatova, A. A. y Demidova, N. V. (2019). The EAF dust chemical and phase composition research techniques. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 1601-1607. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.11.005> ↑Ver página 136
- [Torres y Lapidus, 2016] Torres, R. y Lapidus, G. T. (2016). Copper leaching from electronic waste for the improvement of gold recycling. *Waste Management*, 57, 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.010> ↑Ver página 133, 134
- [Torres y Lapidus, 2017] Torres, R. y Lapidus, G. T. (2017). Closed circuit recovery of copper, lead and iron from electronic waste with citrate solutions. *Waste Management*, 60, 561-568. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.001> ↑Ver página 134
- [Walburga Keglevich de Buzin *et al.*, 2017] Walburga Keglevich de Buzin, P. J., Heck, N. C. y Vilela, A. C. F. (2017). EAF dust: An overview on the influences of physical, chemical and mineral features in its recycling and waste incorporation routes. *Journal of Materials Research and Technology*, 6(2), 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.10.002> ↑Ver página 133, 134, 136
- [Xargay *et al.*, 2019] Xargay, H., Ripani, M., Caggiano, A., Folino, P. y Martinelli, E. (2019). Uso de materiales reciclados en compuestos cementicios. *Tecnura*, 23(60), 38-51. <https://doi.org/10.14483/22487638.14697> ↑Ver página 134
- [Yang *et al.*, 2011] Yang, H., Liu, J. y Yang, J. (2011). Leaching copper from shredded particles of waste printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*, 187(1-3), 393-400. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.051> ↑Ver página 142
- [Zhang *et al.*, 2011] Zhang, Y., Yu, X. y Li, X. (2011). Zinc recovery from franklinite by sulphation roasting. *Hydrometallurgy*, 109(3-4), 211-214. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.07.002> ↑Ver página 141



Optimal Power Flow through Artificial Intelligence Techniques

Flujo óptimo de potencia a través de técnicas de inteligencia artificial

César Hernández ¹, William Sánchez-Huertas ², Víctor Gómez ³

Fecha de Recepción: 14 de Diciembre de 2020

Fecha de Aceptación: 01 de Abril de 2021

Cómo citar: Hernández., C. Sánchez-Huertas., W. y Gómez., V. (2021). Electrical Energy Systems through Artificial Intelligence Techniques. *Tecnura*, 25(69), 150-170. <https://doi.org/10.14483/22487638.18245>

Abstract

Context: The integration of optimization methods into the various processes carried out by an electric power system seeking energy efficiency have led to satisfying results in the reduction of consumption, as well as in terms of technical losses, security increase, and system reliability.

Objective: The purpose of this article is to identify a method offering the best optimization outcome for the power flow of an energy distribution system with 10 nodes at 13,2 kV.

Methodology: The results obtained from the voltage profiles are presented for a 10-node energy distribution system using the Newton Raphson method. Afterwards, the system was optimized using genetic and ant colony algorithms.

Results: The implementation of these techniques determined that the sum of the potential differences of distribution lines is notably reduced with the genetic algorithm. However, the ant colony optimization code takes less time to run and has a lower number of iterations.

Conclusions: The most efficient optimization is achieved with the genetic algorithm, given that the evolution of the population shows better optimization levels in comparison to the ant colony algorithm.

Financing: Universidad Francisco José de Caldas and Colciencias

Keywords: ant colony optimization, artificial, intelligence, genetic algorithm, optimization, power system

Resumen

Contexto: La integración de métodos de optimización en los diversos procesos llevados a cabo por un sistema de energía eléctrica que busca la eficiencia energética ha llevado a resultados satisfactorios en la reducción del consumo, así como en términos de pérdidas técnicas, aumento de seguridad y confiabilidad del sistema.

Objetivo: El propósito de este artículo es identificar un método que ofrezca el mejor resultado de optimización para el flujo de energía de un sistema de distribución de energía con 10 nodos a 13,2 kV.

¹PhD in Engineering, Electronic Engineer, Professor and researcher at Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Email: cahernandezs@udistrital.edu.co

²Electrical Engineer, Professional employed by Codensa, Bogotá, Colombia. Email: william.sanchez@enel.com

³Electrical Engineer, Professional employed by Schneider, Bogotá, Colombia. Email: victor.gomez@se.com

Métodología: Los resultados obtenidos de los perfiles de voltaje se presentan para un sistema de distribución de energía de 10 nodos utilizando el método de Newton Raphson. Posteriormente, el sistema se optimizó utilizando algoritmos genéticos y de colonias de hormigas.

Resultados: La implementación de estas técnicas determinó que la suma de las posibles diferencias de las líneas de distribución se reduce notablemente con el algoritmo genético. Sin embargo, el código de optimización de la colonia de hormigas tarda menos tiempo en ejecutarse y tiene un número menor de iteraciones.

Conclusiones: La optimización más eficiente se logra con el algoritmo genético, dado que la evolución de la población muestra mejores niveles de optimización en comparación con el algoritmo de colonias de hormigas.

Financiamiento: Universidad Francisco José de Caldas y Colciencias

Palabras clave: optimización de colonia de hormigas, inteligencia artificial, algoritmo genético, optimización, sistema eléctrico

Table of Contents

	Page
Introduction	152
Materials and Methods	153
Genetic Algorithms	155
Ant Colony Optimization	156
Results	159
Execution of the Newton-Raphson algorithm	160
Execution of the GA	160
Execution of the Ant Colony Optimization	160
Comparison of results	163
Execution times of the algorithms	166
Number of iterations of the algorithms	166
Analysis of Results	166
Conclusions	168
Competing Interest	168
Acknowledgments	168
References	168

Introduction

Currently, the study and calculation of load flows in power systems is becoming a highly relevant matter (Arito, 2010). The purpose of calculating power flow is to find the values of the nodal voltages and use these variables to determine the flows in the distribution lines. The data obtained are an important tool for the design, planning, operation, and control of electric systems (Costa *et al.*, 2001).

In most cases, the calculation of voltage values requires solving a system of simultaneous non-linear equations. To this effect, the Newton-Raphson (NR) and Gauss-Siedel (GS) iterative methods are considered as an important basis for comparison with any artificial intelligence algorithm (Huertas, 2016). The NR method consists of an iterative procedure in which non-linear equations are used, involving variables such as voltage magnitude, voltage angle, active power, and reactive power. Since there are only two power equations, the remaining variables must be calculated (Játiva-Ibarra *et al.*, 2014). In (Pranith & Bhatti, 2015), the NR method is used to calculate photovoltaic parameters and carry out the modeling process. The GS method is an iterative strategy in which the number of unknown variables is equal to the number of equations to be solved. It consists of designing a converging succession according to previously defined criteria (Collado & López-Sarmiento, 2010). The convergence values are the solutions of the nodal voltages and powers of the electric system. In (Byun *et al.*, 2009), the GS method is chosen to accelerate the solution of power flows in a high-performance reconfigurable computer.

The NR method converges faster than GS. However, this swiftness is overshadowed by the large amount of memory and computational resources required for the execution of the algorithm (Pravos García, 2017). Both methods can lead to convergence problems or incorrect solutions in special cases involving power systems or under low impedances (Remolino & Paredes, 2009). Therefore, it is appropriate to research other methods to solve these types of problems.

The continuous progress achieved in the field of artificial intelligence has enabled the use of different meta-heuristic methodologies to deliver approximations of the power flow algorithms described above. A clear example of this is shown in the work by (Haghray *et al.*, 2016), where the authors studied a coded genetic algorithm with the improved mutation of Mühlenbein (RCGA-IMM). Thus, the optimization task is solved based on the cost function and the transmission-related losses, thus leading to satisfying results regarding load flow. Furthermore, (Nazari-Heris *et al.*, 2019) studied the optimization of co-generation based on whale optimization algorithms (WOA), which are inspired in the behavior of humpback whales, particularly in their hunting patterns for fish close to the surface. This technique mainly focuses on the creation of distinctive bubbles throughout a circle or path. The algorithm operates similarly, seeking the best solution for the target (prey) or the closest one. Hence, in this research, the optimal solution represents the efficiency and viability of WOA and its capacity to obtain better solutions for the load flow convergence in comparison with other optimization techniques regarding operational costs and robust power system implementation.

This article presents a 10-node distribution system, which can be solved through conventional numeric methods and artificial intelligence techniques. In this case, the NR method serves as a numeric strategy to solve the power flow problem. Furthermore, two artificial intelligence techniques are adopted –genetic algorithms (GA) and ant colony optimization (ACO)– in order to optimize the results of the power flow.

This document is organized as follows: first, the power distribution system to be optimized is presented; then, the applied methodology is described; the subsequent sections describe the GA and ACO algorithms, respectively; then, the obtained results are presented; finally, a set of conclusions for the overall work is stated.

Materials and Methods

The starting point for obtaining the necessary data to solve a power flow problem is the one-line diagram of the power system. The input data includes information regarding nodes, transmission lines, transformers, and generators. Their values are used to form the bar admittance matrix of the power system. To build this matrix, the equivalent circuit of the power system must be simplified, so that there is a single admittance between two nodes and a single admittance between each node and the ground.

The one-line diagram used in this exercise is based on the IEEE 1250 standard (IEEE, 2018), given that it represents a general use power system in rural distribution networks of medium-level voltage in Colombia. This power system comprises 10 nodes, where 2 of them are generator nodes. Figure 1 shows the one-line diagram of the power system.

The nodes of the power system are those in which two or more elements are interconnected (Khanacademy, 2018) while maintaining the same voltage level. In Table 1, the types of nodes of the power system are defined.

The load nodes or PQ nodes are those in which the net active and reactive powers are specified, whereas the voltage magnitude and phase angle are still unknown. The stable voltage nodes, or PV nodes, are the ones where the devices (such as synchronous generators) are located. These devices are capable of controlling the voltage magnitude in the terminals through the generation or absorption of the reactive power. In the compensation nodes or SLACK nodes, the known variables are the voltage magnitude in the bar and its phase angle, which serve as a reference for the phase angle in the other bars. In general, the phase angle is set at 0° .

The distribution power lines are in charge of interconnecting the nodes, thus carrying the energy from the generation points up to the load connection points of for final use. The distribution lines in the medium-level voltage are often made of ACSR (Aluminum-Conductor Steel-Reinforced) cables, naked conductors with a steel structure designed for the power level of 13,2 kV. The conductor that meets the power distribution requirements that was chosen to be used for simulation purposes is

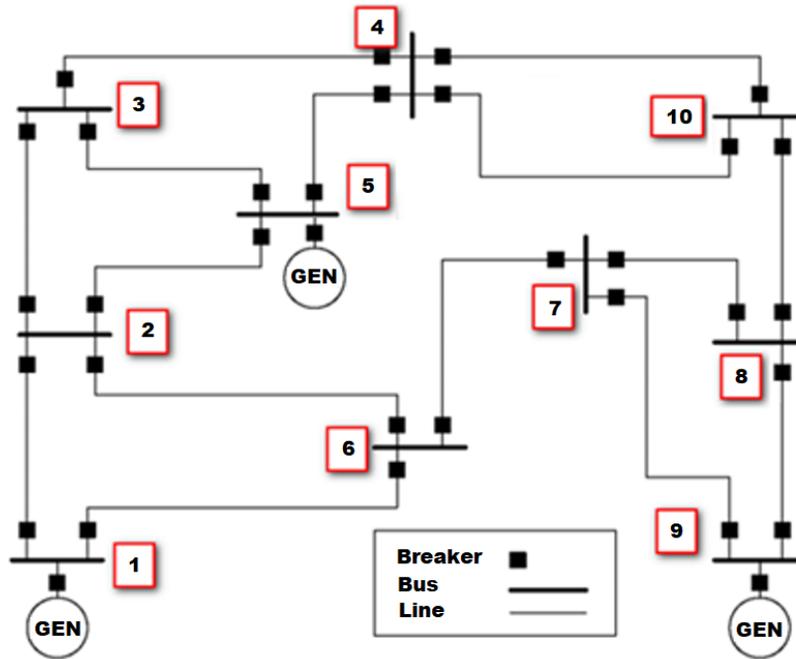


Figure 1. 10-node transmission system

Source: (IEEE, 2018).

Quail (CENTELSA, 2011). Table 2 shows its electric parameters.

The structure that supports the distribution network is from Codensa's LA 204 regulation (2011) (Figure 2). This structure is commonly used in rural distribution networks as a basis for modeling line calculations.

Table 3 includes the length and impedances of the lines that interconnect the nodes.

The loads are the elements of the system that consume energy for its designated end-use. All loads connected to the PQ nodes are modeled in the same way. For this power system, the loads are set with a lagging power factor of 0,6, an active power of 0,3, and a reactive power of 0,4. Traditional methods used to solve power system flows lead to obtaining the values in the nodal voltages that comprise them. Higher potential differences between nodes translate into higher energy losses within the power system. Equation (1) represents the sum of voltage differences between the nodes that are interconnected through a line:

$$y = \sum_{l=1}^{l=n} V_{Lf} - V - Li \quad (1)$$

where V_{Lf} represents the voltage of the final node of line L , and V_{Li} is the value of the voltage in the initial node of L , beginning from the first distribution line and up to the n^{th} distribution line, where n is the number of lines interconnected in the power system.

Table 1. Definition of the nodes of the distribution system

Node	Node Type
1	SLACK
2	PQ
3	PQ
4	PQ
5	PV
6	PQ
7	PQ
8	PQ
9	PV
10	PQ

Source: Authors.

Table 2. Parameter table for the conductor

Conductor	Size AWG	DMG	RMG	AC Resistance (75°C)
Quail	2/0	11,35	3,65	0,584

Source: (CENTELSA, 2011).

The purpose of implementing genetic algorithms and ant colony optimization methods is to minimize the sum of potential differences of all system nodes and, hence, reduce the system losses.

Genetic Algorithms

Genetic Algorithms are systematic methods used to solve search and optimization problems, which are based on biological evolution processes such as population-based selection, sexual reproduction, and mutation (Mora *et al.*, 2016). Figure 3 shows a flow diagram of the genetic algorithm that explains the general operation of the code for the solution of the system in to solve and optimize the solution of power flow. This is carried out for each individual within the population that begins or continues to live in the coded system, starting with random values of the voltage magnitude and phase angle in the bars to be optimized.

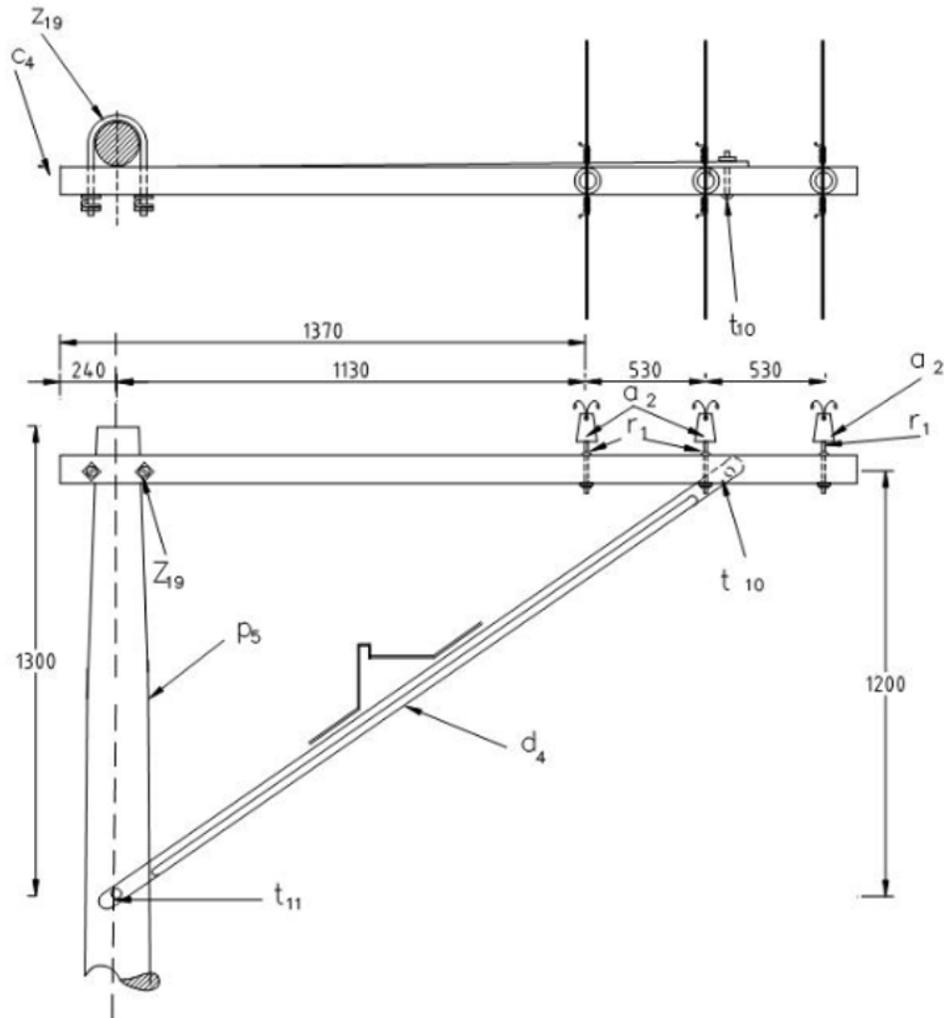


Figure 2. LA 204 Structure for the simple primary circuit

Source: (CODENSA, 2011).

Ant Colony Optimization

Solving computational problems by using ACO involves analyzing the behavior of ants and their pheromone-based communication. Pheromones lead ants to find the shortest paths between their nest and possible food sources (Soifer & Loiseau, 2015). Figure 4 shows the flow diagram of the algorithm.

The iterative procedure of ACO is based on the probabilistic methods described below. The k^{th} ant moves from state X to state Y with the probability shown in Equation (2).

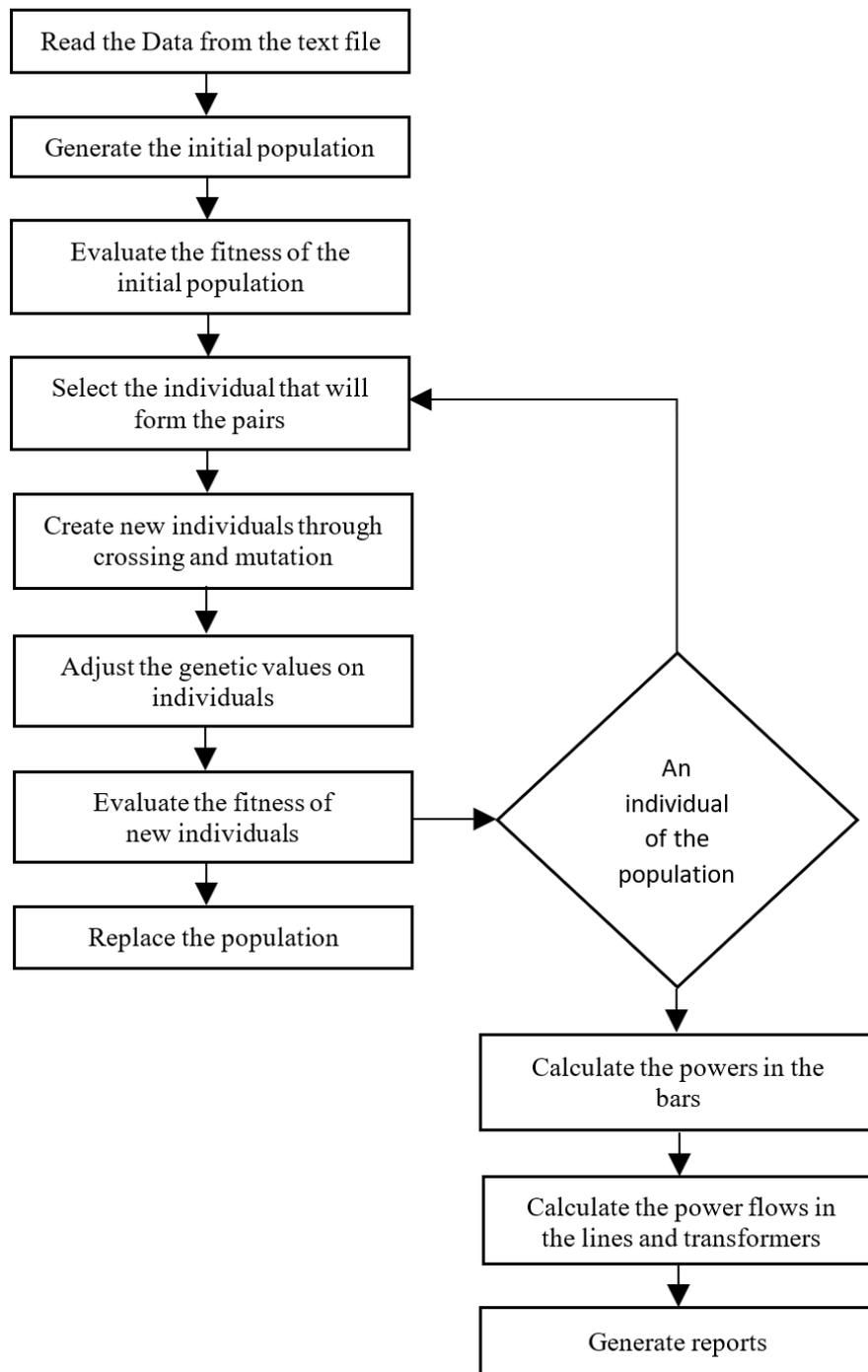


Figure 3. Flow Diagram of the genetic algorithm

Source: (IEEE, 2018).

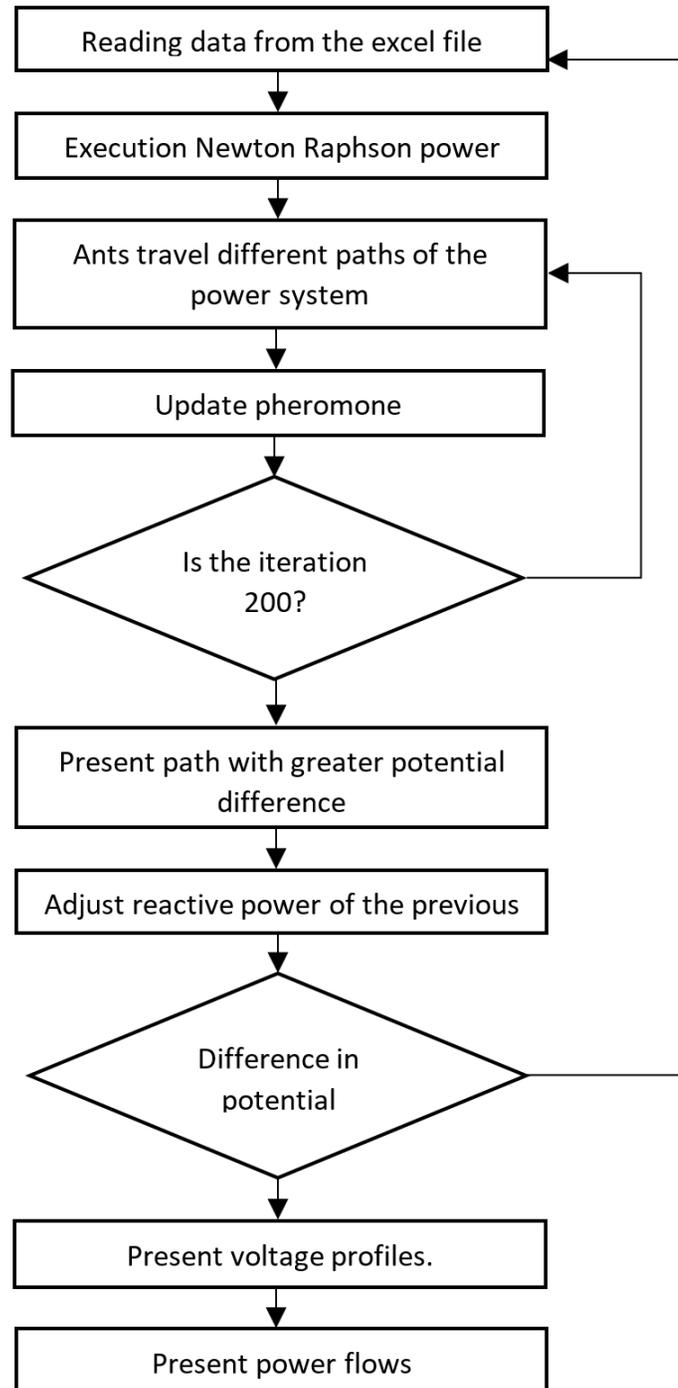


Figure 4. ACO diagram

Source: Authors.

Table 3. Distance between nodes and impedances of the lines

Initial Node	Final Node	Length (km)	R_(km)	L_(km)	C_(km)
1	2	10	0,083792	0,177283	0,000474
1	6	13	0,108930	0,230468	0,000617
2	3	22	0,184343	0,390023	0,001044
2	5	18	0,150826	0,319110	0,000854
2	6	20	0,167584	0,354567	0,000949
3	4	28	0,234618	0,496394	0,001329
3	5	25	0,209481	0,443209	0,001186
5	4	22	0,184343	0,390023	0,001044
4	10	20	0,167584	0,354567	0,000949
6	7	15	0,125688	0,265925	0,000712
7	8	12	0,100550	0,212740	0,000569
7	9	8	0,067033	0,141826	0,000379
9	8	16	0,134067	0,283653	0,000759
8	10	13	0,108930	0,230468	0,000617

Source: (CENTELSA, 2011).

$$P_{xy}^k = \frac{(\tau_{xy}^\alpha)(\eta_{xy}^\beta)}{\sum (\tau_{xy}^\alpha)(\eta_{xy}^\beta)} \quad (2)$$

where τ_{xy} is the number of pheromones deposited in the transition from state x to y , $\alpha \geq 0$ is a parameter used to control the influence of τ , and η is the convenience of state xy (an *a priori* knowledge commonly defined as $1/dx$, where d is the distance and $\beta \geq 1$ is a parameter controlling the influence of η_{xy}).

The ACO method consists of three phases: 1) parameter initialization, 2) exploration phase, and 3) exploitation phase. This method was used to solve and optimize the 10-node power system.

Results

This section presents the nodal voltages obtained after the execution of the NR algorithm, GAs and ACO. Then, the errors from GA and ACO are computed based on the data derived from NR.

Execution of the Newton-Raphson algorithm

In order to compare the results between GA and ACO, the power flow is computed for the NR method. These results are then used to establish a comparison. The voltage profiles derived from the simulation of the power system with this method are presented in Table 4, where nodes 3, 4, and 10 remain under the 95 % threshold.

Table 4. Nodal voltages with the Newton-Raphson method

Node	Tension Magnitude	Tension Angle
1	1,0000	0,0000
2	0,9433	-5,5748
3	0,8939	-10,3293
4	0,8666	-11,2481
5	1,0000	-13,0956
6	0,9353	-3,1296
7	0,9335	-4,1590
8	0,8943	-5,5463
9	1,0000	-3,3565
10	0,8373	-8,3565

Source: Authors.

Execution of the GA

Table 5 shows the execution results of the GA. The voltage values in every node are significantly increased and, hence, optimize the power system. PG and PD are in MW, and QG and QD are in MVAR.

Table 6 shows that the GA can be used to calculate the system power flow and determine the energy distribution in the lines.

The result of the GA was solved within 106 generations, with a population of 300 individuals, and 150 crossing operations in every generation.

Execution of the Ant Colony Optimization

The ant colony algorithm was programmed so that the execution results of the NR method could serve as its input parameters. To this effect, the possible paths where the ant could pass through were defined by stating an analogy between the distances and potential differences within transmis-

Table 5. Results of the power flow with the GA

N	V (pu)	Angle	PG	QG	PD	QD
1	1,0000	0,0000	0,51	0,03	0,00	0,00
2	0,9984	-0,3958	0,00	0,25	0,15	0,20
3	0,9963	-0,7245	0,00	0,10	0,15	0,20
4	0,9972	-0,8107	0,00	0,25	0,15	0,20
5	1,0000	-0,7366	0,10	0,41	0,15	0,20
6	0,9957	-0,1398	0,00	0,00	0,15	0,20
7	0,9957	-0,0158	0,00	0,00	0,15	0,20
8	0,9947	-0,1722	0,00	0,00	0,15	0,20
9	1,0000	0,2042	0,60	0,41	0,00	0,20
10	0,9955	-0,5677	0,00	0,25	0,15	0,20

Source: Authors.

sion lines. Therefore, after the code was executed, the paths with the highest potential differences were found by both ants; they are shown in Tables 7 and 8. Table 9 shows the path with the largest pheromone trail in all nine iterations.

Table 10 shows the results obtained after five iterations of the algorithm. The voltage levels increase in nodes 2, 3, 4, 6, 7, 8, and 10, since there is a compensation in the reactive power generated in each node. Table 11 shows the corrections applied to the Q generated in the nodes after nine iterations of the algorithm.

Table 6. Power flow with GA

Type	Node i	Node f	P (MW)	Q (MVAR)	S (MVA)
Line	1	2	0,35	-0,08	0,36
Line	2	1	-0,35	0,08	0,36
Line	1	6	0,16	0,11	0,19
Line	6	1	-0,16	-0,11	0,19
Line	2	3	0,14	-0,02	0,14
Line	3	2	-0,14	0,01	0,14
Line	2	5	0,13	-0,12	0,18
Line	5	2	-0,13	0,11	0,17
Line	2	6	-0,07	0,11	0,13
Line	6	2	0,07	-0,12	0,14
Line	3	4	0,02	-0,03	0,04
Line	4	3	-0,02	0,02	0,03
Line	3	5	-0,03	-0,08	0,08
Line	5	3	0,03	0,06	0,07
Line	5	4	0,05	0,04	0,07
Line	4	5	-0,05	-0,05	0,07
Line	4	10	-0,08	0,08	0,11
Line	10	4	0,08	-0,09	0,12
Line	6	7	-0,07	0,03	0,07
Line	7	6	0,07	-0,04	0,07
Line	7	8	0,12	-0,02	0,12
Line	8	7	-0,12	0,01	0,12
Line	7	9	-0,34	-0,15	0,37
Line	9	7	0,34	0,15	0,37
Line	9	8	0,26	0,06	0,27
Line	8	9	-0,26	-0,07	0,27
Line	8	10	0,23	-0,14	0,27
Line	10	8	-0,23	0,14	0,27

Source: Authors.

Table 7. Paths found by ant 1

1 Step	2 Step	3 Step	4 Step	5 Step
1	6	7	8	10
1	6	7	8	10
1	6	7	8	10
1	6	7	8	10
1	2	5	4	10
1	6	7	8	10
1	6	7	8	10
1	2	5	4	10
1	6	7	8	10

Source: Authors.

Table 8. Paths found by ant 2

1 Step	2 Step	3 Step	4 Step	5 Step	6 Step
1	6	7	8	10	-
1	6	7	8	10	-
1	6	7	8	10	-
1	6	7	8	10	-
1	2	3	5	4	10
1	2	5	4	10	-
1	6	7	9	8	10
1	6	7	8	10	-
1	6	7	8	10	-

Source: Authors.

Comparison of results

In order to compare which algorithm offers the best optimization, the voltage magnitudes derived from the algorithms are shown in Figure 5, which shows an increase in the voltage of every node within the power system with GA compared to NR and with ACO compared to NR. Genetic

Table 9. Paths with the largest pheromone trails

1 Step	2 Step	3 Step	4 Step	5 Step
1	6	7	8	10
1	6	7	8	10
1	6	7	8	10
1	6	7	8	10
1	2	5	4	10
1	6	7	8	10
1	6	7	8	10
1	6	7	8	10
1	6	7	8	10
1	6	7	8	10

Source: Authors.

Table 10. Correction of the nodal voltages with the ACO method

V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
1,0000	0,9433	0,8939	0,8666	1,0000	0,9353	0,9335	0,8943	1,0000	0,8373
1,0000	0,9437	0,8957	0,8706	1,0000	0,9400	0,9386	0,9015	1,0000	0,8458
1,0000	0,9461	0,8975	0,8745	1,0000	0,9446	0,9437	0,9086	1,0000	0,8541
1,0000	0,9474	0,8993	0,8783	1,0000	0,9491	0,9489	0,9155	1,0000	0,8622
1,0000	0,9487	0,9010	0,8820	1,0000	0,9536	0,9535	0,9223	1,0000	0,8702
1,0000	0,9516	0,9046	0,8899	1,0000	0,9548	0,9547	0,9252	1,0000	0,8773
1,0000	0,9529	0,9062	0,8935	1,0000	0,9592	0,9595	0,9319	1,0000	0,8850
1,0000	0,9541	0,9078	0,8970	1,0000	0,9636	0,9642	0,9384	1,0000	0,8926
1,0000	0,9553	0,9094	0,9004	1,0000	0,9679	0,9689	0,9449	1,0000	0,9001
1,0000	0,9566	0,9109	0,9038	1,0000	0,9722	0,9735	0,9513	1,0000	0,9075

Source: Authors.

algorithms optimize the voltage profiles in the system nodes by 2,46 times more than the ant colony optimization.

Table 12 shows the percentage of errors obtained after running the GA and ACO methods. The GA optimization is more effective, given that no node has a percentage error higher than 1 %.

Table 13 shows the sum of the voltage differences between the system power lines for each algorithm used in the calculation of the power flow. It is evidenced that the sum in NR is 0,775, the sum

Table 11. Reactive compensation in the nodes

Bus_i	Node Type	PWg	PQg	PWd	PQd	Bsh	Vmag	Vang	bKV	FP Load	Vmin
1	1	0,70	0	0,15	0,00	0,00	1,00	0,00	13,20	0,00	0,95
2	3	0,00	0,03	0,15	0,20	0,00	1,00	0,00	13,20	0,60	0,95
3	3	0,00	0	0,15	0,20	0,00	1,50	0,00	13,20	0,60	0,95
4	3	0,00	0,03	0,15	0,20	0,00	1,00	0,00	13,20	0,60	0,95
5	2	0,10	0	0,15	0,20	0,00	1,00	0,00	13,20	0,60	0,95
6	3	0,00	0,2	0,15	0,20	0,00	1,00	0,00	13,20	0,60	0,95
7	3	0,00	0,2	0,15	0,20	0,00	1,00	0,00	13,20	0,60	0,95
8	3	0,00	0,2	0,15	0,20	0,00	1,00	0,00	13,20	0,60	0,95
9	2	0,50	0	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	13,20	0,00	0,95
10	3	0,00	0,11	0,15	0,20	0,00	1,00	0,00	13,20	0,60	0,95

Source: Authors.

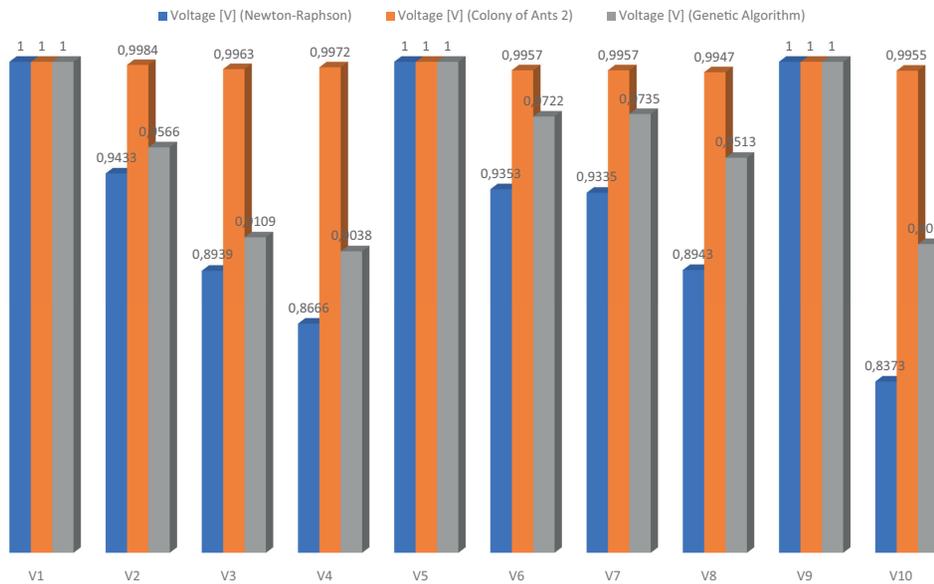


Figure 5. Nodal voltages for Newton Raphson vs ACO vs GA

Source: Authors.

in GA is 0,0295, and the sum in ACO is 0,5102. This indicates that the algorithm that offers the best results is GA since it reduces the voltage differences and, as a consequence, reduces the losses within transmission lines.

Table 12. Percentage errors after the optimization of GA and ACO

Node	GA Percent Error (%)	ACO Percent Error (%)
V1	0,000	0,000
V2	0,160	4,340
V3	0,370	8,910
V4	0,280	9,620
V5	0,000	0,000
V6	0,430	2,780
V7	0,430	2,650
V8	0,530	4,870
V9	0,000	0,000
V10	0,450	9,250

Source: Authors.

Execution times of the algorithms

Table 14 shows the execution times of the discussed algorithms. The ACO method runs in 21,02 s, while the GA takes 7501 s, (54 s faster than ACO).

Number of iterations of the algorithms

Table 15 shows the number of iterations required by the program to converge. The GA converges in 106 iterations, whereas ACO converges in 9 iterations.

Analysis of Results

The GA was originally far from the solution and approached it exponentially as more generations were produced. It solved in 13 generations. The GA optimizes the system nodes outside of the defined range. In this example, it was evidenced that genetic algorithms are capable of solving power flow problems. Although only a few generations were necessary to find a solution with an acceptable tolerance, the solution can change depending on the initial population of the system.

GAs have the advantage of seeking a solution based on a population of 'dots' without the need for the derivatives of the power flow equations. Their disadvantage lies in the fact that they can be relatively slow in delivering a solution. Since the population size is proportional to the number of

Table 13. Potential difference between nodes

Initial Node	Final Node	Length (km)	Nfin - Nini (V) Newton Raphson	Nfin - Nini (V) Genetic Algorithm	Nfin - Nini (V) Ant Colony
1	2	10	0,0567	0,0016	0,0434
1	6	13	0,0647	0,0043	0,0278
2	3	22	0,0494	0,0021	0,0457
2	5	18	0,0567	0,0016	0,0434
2	6	20	0,0080	0,0027	0,0156
3	4	28	0,0273	0,0009	0,0071
3	5	25	0,1061	0,0037	0,0891
5	4	22	0,1334	0,0028	0,0962
4	10	20	0,0293	0,0017	0,0037
6	7	15	0,0018	0,0000	0,0013
7	8	12	0,0392	0,0010	0,0222
7	9	8	0,0392	0,0010	0,0222
9	8	16	0,1057	0,0053	0,0487
8	10	13	0,0570	0,0008	0,0438
		Total	0,7745	0,0295	0,5102

Source: Authors.

Table 14. Execution times of the algorithms

Execution time of Newton Raphson (s)	Execution time of the Genetic Algorithm (s)	Execution time of the Ant Colony method (s)
11,022132	75,012208	21,021900

Source: Authors.

Table 15. Number of iterations for each algorithm

Number of iterations Newton Raphson	Number of iterations Genetic Algorithm	Number of iterations Ant Colony
5	106	9

Source: Authors.

nodes that obey probabilistic rules, many generations could be required to find a solution.

The ant colony algorithm has various limitations, since the definition of the algorithm used to solve power system flows requires an adjustment of the initial simulation conditions for the results to be coherent. This algorithm rapidly identifies the most unbalanced nodes of the system, yet its optimization process is not effective.

Conclusions

After executing the algorithms, it was determined that the sum of the potential differences in the distribution lines drastically drops with the GA. Nonetheless, the code takes less time to run and has a lower number of iterations compared to the ant colony alternative. Hence, it is concluded that GA requires more memory usage and computational resources. The most efficient optimization is achieved with GAs since the evolution of the population shows better optimization levels in comparison to the ant colony algorithm. The latter presents a low level of optimization in the detection of the paths with a higher potential difference. Genetic algorithms can be used to solve power flow problems, as an alternative to iterative methods such as Newton-Raphson and Gauss-Seidel.

Competing Interest

The authors declare that they do not have any competing interests.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Center for Research and Scientific Development of Universidad Distrital Francisco José de Caldas, as well as Colciencias, for supporting and funding this research project.

References

- [Byun *et al.*, 2009] Byun, J.-H., Ravindran, A., Mukherjee, A., Joshi, B., & Chassin, D. (2009). Accelerating the gauss-seidel power flow solver on a high performance reconfigurable computer. In IEEE (Eds.) *Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM 2009)*. IEEE. ↑Ver página 152
- [CENTELSA, 2011] CENTELSA (2011). *Cables de Aluminio Desnudo*. Recuperado de: <https://www.centelsa.com/pdf/CablesdeAluminioDesnudo.pdf> ↑Ver página 154, 155, 159

- [CODENSA, 2011] CODENSA S. A. (2011). *LA204 Circuito primario sencillo construcción tipo bandera con cruceta de 2,5 m.* http://likinormas.micodensa.com/Norma/lineas_aereas_urbanas_distribucion/lineas_aereas_11_4_13_2_kv/la204_circuito_primario_sencillo_construccion_tipo_bandera_cruceta ↑Ver página 156
- [Collado & López-Sarmiento, 2010] Collado, A. L. & López-Sarmiento, J. A. (2010). *Algoritmos para el flujo de carga en circuitos de distribución secundaria.* Santa Clara. <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/999/Ariel%20López%20Collado.pdf?sequence=1&isAllowed=y> ↑Ver página 152
- [Costa *et al.*, 2001] Costa V. M., Martins M. & Preira L. R. (2001). An augmented Newton-Raphson power flow formulation based on current injections. *Electrical Power and Energy Syst.*, 23(4), 305-312. [https://doi.org/10.1016/S0142-0615\(00\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S0142-0615(00)00045-4) ↑Ver página 152
- [Haghray *et al.*, 2016] Haghray, A., Nazari-Heris, M., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2016). Solving combined heat and power economic dispatch problem using real coded genetic algorithm with improved Mühlenbein mutation. *Applied Thermal Engineering*, 99, 465-475. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.136> ↑Ver página 152
- [Huertas, 2016] Huertas, C. (2016). *Preparadurías Sistemas de Potencia I : Flujos de Carga.* ↑Ver página 152
- [IEEE, 2018] IEEE (2018). *Estandar IEEE 1250: Guide for Identifying and Improving Power Quality in Power Systems.* IEEE. ↑Ver página 153, 154, 157
- [Vazquez, 2014] Vazquez, J. (2014). *Aplicación del algoritmo de colonia de hormigas al problema de rutas de reparto con destinos móviles* [Thesis, Universidad de Sevilla]. Recuperado de: http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5760/fichero/PFC_Jesus_Vazquez.pdf ↑Ver página
- [Játiva-Ibarra *et al.*, 2014] Játiva-Ibarra, J., Constante-Flores, G., & Cabrera-Celi, G. (2014). Flujo de Potencia por Newton-Raphson con el Jacobiano Calculado en las Ecuaciones de Errores de Potencia. *Revista Politécnica*, 33(1), e157. https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/157 ↑Ver página 152
- [Khanacademy, 2018] Khanacademy. (2018). *La terminología de los circuitos (artículo)* | Khan Academy. <https://es.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic/circuit-elements/a/ee-circuit-terminology> ↑Ver página 153
- [Arito, 2010] Arito, F. L. A. (2010). *Algoritmos de Optimización basados en Colonias de Hormigas aplicados al Problema de Asignación Cuadrática y otros problemas relacionados* [Undergraduate thesis, Universidad Nacional de San Luis]. <http://www0.unsl.edu.ar/~dmcc/files/tesis-f.pdf> ↑Ver página 152

- [Mora *et al.*, 2016] Mora, J. C. S. T., Marín, J. M., & Romero, N. H. (2016). *Introducción a los Algoritmos Genéticos con Matlab*. Tecnologías avanzadas en ingeniería. Recuperado de: https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Lectura/icbi/asignatura/introduccion_a_los_algoritmos_geneticos_con_matlab.pdf ↑Ver página 155
- [Nazari-Heris *et al.*, 2019] Nazari-Heris, M., Mehdinejad, M., Mohammadi-Ivatloo, B., & Babamalek-Gharehpetian, G. (2019). Combined heat and power economic dispatch problem solution by implementation of whale optimization method. *Neural Computing and Applications*, 31(2), 421-436. ↑Ver página 152
- [Pranith & Bhatti, 2015] Pranith, S., & Bhatti, T. S. (2015, March 12-13). Modeling and parameter extraction methods of PV modules-Review [Conference presentation]. 2015 International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE 2015). <https://doi.org/10.1109/RDCAPE.2015.7281372> ↑Ver página 152
- [Pravos García, 2017] Pravos García, L. (2017). *Análisis de flujos de carga para el análisis de redes de distribución. Implementación del algoritmo "Forward and Backward"* [Tesis, Universidad Politécnica de Madrid]. Recuperado de: http://oa.upm.es/47864/1/TFG_LETICIA_PRAVOS_GARCIA.pdf ↑Ver página 152
- [Remolino & Paredes, 2009] Remolino, A. S. & Paredes, .H. F. R. (2009). *Método Eficiente Para La Solución De Flujos De Potencia En Sistemas Eléctricos De Distribución*. 1(1), 322. ↑Ver página 152
- [Soifer & Loiseau, 2015] Soifer, A. & Loiseau, I. (2015). *Algoritmos de Colonia de Hormigas para el Problema del Viajante de Comercio por Familias y para el Problema de Ruteo de Vehículos por Familias* [Conference presentation]. 13° Simposio Argentino de Investigación Operativa. <http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/59301/Resumen.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y> ↑Ver página 156
- [Stevenson,1996] Stevenson, W. D. (1996). *Análisis de Sistemas de Potencia*. McGraw-Hill. ↑Ver página
- [Sánchez-Huertas, 2018] Sánchez-Huertas, W., Gómez, V., & Hernández, C. (2018). Optimization Algorithms for Solving Microgrid and Smart Grid Integration Problems. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(21), 14886-14892. https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n21_08.pdf ↑Ver página



Prototipo de cosecha inteligente de agua lluvia para mejorar la eficiencia energética residencial en Bogotá

Intelligent Rainwater Harvesting Prototype to Improve Residential Energy Efficiency in Bogota

Carlos Arturo Ramírez-Escobar ¹, Clara Inés Buriticá-Arboleda ²

Fecha de Recepción: 23 de Noviembre de 2020

Fecha de Aceptación: 01 de Abril de 2021

Cómo citar: Ramírez-Escobar, C.A. y Buriticá-Arboleda, C.I. (2021). Prototipo de cosecha inteligente de agua lluvia para mejorar la eficiencia energética residencial en Bogotá. *Tecnura*, 25(69), 171-195. <https://doi.org/10.14483/22487638.17975>

Resumen

Objetivo: Presentar los resultados e impactos de un prototipo de cosecha inteligente de agua lluvia diseñado para la sustitución parcial de agua potable, incluyendo la energía embebida requerida para su producción y distribución, en una vivienda unifamiliar en Bogotá (Colombia).

Contexto: La ciudad de Bogotá, posee un régimen bimodal de precipitaciones frecuentes con mínimos mensuales multi-anales que superan los 30 mm y como promedio superan los 60 mm. Esta frecuencia de lluvias representa un potencial hídrico y energético, almacenado en la atmósfera, disponible localmente durante la mayor parte del año, de manera que posibilita su realización bajo esquemas novedosos de diseño tecnológico y económico de los sistemas de cosecha de aguas lluvias (SCALL). En este artículo nos centraremos en el establecimiento de las bases de diseño de un prototipo de cosecha de agua lluvia unifamiliar que logre capturar las potencialidades pluviales y energéticas de su entorno y pueda competir eficientemente frente al suministro de agua de la Empresa de Acueducto de Bogotá (EAB). Este permitirá sustituir los usos de agua potable en inodoros, lavado de ropa, riego de jardines y limpieza de espacios y tanques, lo cual se logrará con menor consumo de energía que el proveedor centralizado de agua potable.

Método: Se parte de considerar al agua lluvia como un recurso distribuido, tanto de agua como de energía, que tiene la capacidad de sustituir al agua potable provista como servicio energético de abastecimiento centralizado de agua de la EAB. Para evaluar la eficiencia de la sustitución de agua potable por agua lluvia cosechada, se genera un nuevo método que en solo cinco pasos permite evaluar la eficiencia comparativa, tomando como línea de base la proyección del desempeño del servicio centralizado de agua potable, respecto a la medida de mejoramiento del desempeño del prototipo SCALL. Para ello, se toma como principal indicador de desempeño a la intensidad energética comparada; la cual, a su vez, posibilita el cálculo de beneficios múltiples de la eficiencia energética.

Resultados: El prototipo SCALL, en las etapas iniciales de su implementación, logró ahorros del agua potable utilizada en la vivienda del 25 %, de la energía embebida del 26 % y el abatimiento de los gases de efecto invernadero en un 27 %.

¹Ingeniero mecánico, magíster en Turbinas, magíster en Ingeniería Eléctrica, doctor en Gestión Eficiente de la Energía Eléctrica. Profesor-investigador de la Universidad Autónoma de Colombia. Bogotá, Colombia. Email: ramirez.carlos@fuac.edu.co

²Ingeniera electricista, especialista en Informática Industrial, doctora en Gestión Eficiente de la Energía Eléctrica. Profesora-investigadora de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Email: ciburiticaa@udistrital.edu.co

Esto fue obtenido con apenas un 22,4 % de la capacidad nominal de diseño del prototipo, en un periodo de estudio de 56 meses. En este periodo se logró recuperar la inversión a partir de los ahorros económicos producto de la sustitución del agua potable por agua lluvia. Los resultados sugieren que la EAB podría desarrollar un programa de implementación de SCALL eficientes por parte de sus usuarios, lo que le permitiría obtener cerca de un ingresos y ahorros dinerarios que representarían cerca del 2 % del total de ingresos que produciría cada SCALL residencial. El grado de éxito dependería de la masificación del programa. Esto sin contabilizar los beneficios que obtendría al aplazar las inversiones por ampliación de infraestructura, seguridad de abastecimiento y confiabilidad que proporciona la implementación de los SCALL eficientes.

Conclusiones: Los resultados de la evaluación de la eficiencia energética arrojan la completa viabilidad tecnológica, económica, ambiental y social del prototipo SCALL de un usuario residencial en Bogotá. A la vez se dispone de una nueva metodología para la evaluación del potencial de eficiencia energética y sus beneficios múltiples cuando es escrutado un servicio energético provisto por un recurso distribuido como es el agua lluvia. Para el Distrito Capital de Bogotá resulta conveniente tanto social y ambientalmente desarrollar una política de promoción del SICCALL como medida de gestión eficiente de la demanda de agua y energía. Esta medida puede ser posibilitada por el desarrollo de economías de red y colaborativas, alrededor de recursos distribuidos de agua y energía, en la vía del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y participación ciudadana, de las llamadas ciudades inteligentes.

Palabras clave: cosecha de agua lluvia, eficiencia energética, intensidad energética, conservación del agua, respuesta de la demanda, servicios energéticos.

Abstract

Objective: To present the results and impacts of a prototype for harvesting rainwater in a single-family house in Bogota (Colombia), designed to save both potable water consumption as well as the embodied energy required to produce and distribute it from the city water system.

Context: The city of Bogota has a bimodal rainfall regime with multiannual monthly minima above 30 mm, and an average above 60 mm. This high rainfall intensity and frequency constitutes a potential hydric and energetic resource, which is available to the region during most of the year, and could be extracted through new systems for rainwater collection and use (referred to as SCALLs, for its acronym in Spanish). In this article, we will focus on the initial design of a rainwater harvester prototype with a capacity for one family. This prototype has been designed to operate under the high rainfall potential of the city, in order to store and deliver water efficiently to a household connected to the main local water provider (the Aqueduct Company of Bogota, EAB in Spanish). The water supplied by the prototype is enough to substitute the consumption of tap water for the usage of toilets, washing machine, watering of gardens, and cleaning of tanks and general surfaces. In comparison to the water provider, the rainwater harvester prototype is competitive with the quantity of water it delivers, and with the reduced consumption of energy required to supply it.

Method: To start the analysis of potential energy efficiency, we considered rainwater as a composition of two distributed resources: the water itself, and its embedded energy. Thus, rainwater has the potential to both replace the tap water consumption and reduce the energy service provided by the centralized water supply of the EAB. To evaluate the efficiency of this substitution, we generated a new 5-step method that allowed us to define the baseline efficiency as a performance projection of the centralized tap water service, and then compare it to the performance improvement of the SCALL prototype. We found that the main performance indicator is the comparative energy intensity, which enables the calculation of multiple benefits of energy efficiency.

Results: The SCALL prototype, in the initial stages of its implementation, achieved savings of 25 % in drinking water used in the home, 26 % of embedded energy and a reduction of greenhouse gases by 27 %. This was obtained with only 22.4 % of the nominal design capacity of the prototype, in a study period of 56 months. In this period, it was possible to recover the investment from the economic savings resulting from the substitution of drinking water for rainwater. The results sug-

gest that the EAB could develop an efficient SCALL implementation program by its users, which would allow it to obtain close to an income and monetary savings that would represent close to 2 % of the total income that each residential SCALL would produce. The degree of success of which would depend on the massification of the program. This without accounting for the benefits that would be obtained by deferring investments for infrastructure expansion, security of supply and reliability provided by the implementation of efficient SCALLs.

Conclusions: The results of the energy efficiency evaluation show the technological, economic, environmental and social viability of the SCALL prototype of a residential user in Bogotá. At the same time, we propose a new methodology for evaluating the energy efficiency potential from a distributed resource such as rainwater, allowing scrutiny of its multiple benefits compared to a centralized service supplier. For the Capital District of Bogotá, it would be beneficial (socially and environmentally) to develop a policy to promote SICCALL to efficiently manage the demand for water and energy. This policy could be made possible by the development of collaborative network economies, around distributed water and energy resources, in order to meet the objectives of sustainable development and citizen participation, of the so-called smart cities.

Keywords: rainwater harvesting, energy efficiency, energy intensity, water conservation, demand response, energy services.

Tabla de Contenidos

	Página
Introducción	173
Método	178
Elaboración de la línea de base	179
Desglose del pronóstico de referencia	181
Caracterización de las medidas de eficiencia	181
Valoración de los resultados de beneficios múltiples	185
Medición de los efectos económicos y otros efectos de recursos	186
Discusión de resultados	187
Conclusiones	190
References	191

Introducción

En las ciudades existen dos tipos de sistemas de cosechas de aguas lluvias (SCALL): a) el centralizado, el cual está asociado a las escorrentías por el suelo urbano y usualmente involucra a la infraestructura del sistema de drenaje ciudadano (alcantarillado de aguas pluviales) y puede abarcar el servicio comunitario, o del sistema de acueducto de la urbe; y b) el descentralizado, asociado al

vertido de las cubiertas de los edificios y casas citadinas y que involucra infraestructura construida o modificada con tal finalidad (Retamal, Abeyesuriya, Turner y White, 2009, p. 5).

En los edificios y casas citadinas, los SCALL son concebidos, diseñados e implementados para cumplir los fines del consumo industrial, de servicio o de vivienda y se especifican principalmente como bien sustituto en los usos finales, donde no es requerida la calidad potable del agua suministrada por el acueducto centralizado; aunque se encuentran aplicaciones donde el agua lluvia se plantea como sustituto económico del suministro de agua de toda la edificación.

Los sistemas residenciales de cosecha de agua lluvia pueden ser unifamiliares y/o comunitarios (Agatón, Ruiz y Sayago, 2016). En este artículo nos centraremos en el establecimiento de las bases de diseño de un prototipo de cosecha de agua lluvia unifamiliar que logre capturar las potencialidades pluviales y energéticas de su entorno, y pueda competir eficientemente frente al suministro de agua de la Empresa de Acueducto de Bogotá (EAB). Este permitirá sustituir los usos de agua potable en inodoros, lavado de ropa, riego de jardines y limpieza de espacios y tanques, lo cual se logrará con menor consumo de energía que el proveedor centralizado de agua potable.

La competencia por esta sustitución es especialmente exigente para los usuarios del servicio, ya que en la estructura tarifaria del servicio de suministro de agua, efectuado por la EAB, existen costos hundidos y otros beneficios no reconocidos, como los siguientes:

- a. Se excluye, en la práctica, el costo del uso del agua (Lizcano, Congote y Angarita, 2012).
- b. Otra distorsión del costo es abonable a la disminución del aforo contabilizado para el cobro tarifario del servicio de alcantarillado (a la salida de aguas servidas), cuando se utiliza un SCALL para fines residenciales, en virtud de la carencia de medición en la salida de la residencia.
- c. En la estructura tarifaria no se tienen en cuenta los beneficios ambientales que trae consigo la retención y uso de agua lluvia, como el decremento de la huella hídrica de EAB (Pérez, Flores, González y Mota, 2019), así como el incremento de la huella verde del agua residencial al utilizar sistemas y recursos distribuidos de suministro de agua como los SCALL.
- d. Tampoco se tienen en cuenta los atributos de costos del servicio energético que posee el suministro de agua en forma de *energía embebida* durante la prestación del servicio de acueducto y alcantarillado (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2012, pp. 665-669), cuya eficiencia podría ser transada en mercados meritorios de seguridad de abastecimiento eléctrico (Buriticá-Arboleda, Ramírez-Escobar y Álvarez-Bel, 2019), como participación activa de la demanda (Ramírez-Escobar, 2012, Ramírez-Escobar, 2007).
- e. Así mismo, no se tienen en cuenta los costos evitados por emisión de gases de efecto invernadero (GEI), debido a la disminución de la huella de carbono al alcanzar mayor eficiencia energética durante la implantación de los SCALL.

En estas condiciones, la viabilidad de la utilización del SCALL, en Bogotá, está mucho más ligada a los méritos de diseño e implementación que pueda exhibir, su propia estructura de costos de inversión, al ser comparada con los méritos de la estructura de costos del servicio centralizado de la EAB; institución que ha sido certificada en 2016 como empresa de carbono neutro (ICONTEC, 2016). En consecuencia, un usuario-responsivo que desee implementar su propio SCALL debe previamente considerar la gestión eficiente de su demanda de agua, basada en tres aspectos complementarios a saber:

- a. La conservación de los recursos hídricos, que se adopta en los edificios mediante el uso de aparatos y accesorios eficientes en el uso del agua (Carragher, Stewart y Beal, 2012, Manco Silva, Guerrero Erazo y Ocampo Cruz, 2012, US EPA, 2016).
- b. La información de los patrones y hábitos de consumo de agua (Stewart, Willis, Panuwatwanich y Sahin, 2013), ya que la reducción de la demanda de agua también depende de un cambio en el comportamiento del uso del agua (Acosta Alarcón, Rodríguez y Kua, 2019, Goette, Leong y Qian, 2019, Tijs *et al.*, 2017), obtenida mediante tecnologías de visualización y campañas de sensibilización (García Lirios *et al.*, 2013).
- c. La implementación de las opciones de suministro de agua descentralizado a los edificios, como la sustitución de fuentes de agua potable con agua reciclada o lluvia (SCALL).

En consecuencia, es deseable que el SCALL forme parte y/o coadyuve a la creación de un sistema de administración y manejo del lado de la demanda del suministro de agua, pues es claro que las medidas de conservación y el cambio de patrones de uso aumentan la eficiencia del SCALL.

Se parte de la premisa de que los SCALL son amigables con el medio ambiente, y el agua lluvia es un recurso renovable; sin embargo, uno de los temas emergentes –surgido de los estudios del ciclo de vida en las ciudades que poseen programas de gestión de la demanda a través de los SCALL, al evaluar los nexos agua/energía– consiste en que su eficiencia energética comparativa con la de los acueductos centralizados, en la práctica, puede tener un pobre desempeño (Vieira *et al.*, 2014). El indicador mayormente utilizado para evaluar esta comparación es la intensidad energética (es decir, unidad de energía por unidad de agua), pues permite juzgar la viabilidad ambiental de los SCALL, frente a la evaluación del ciclo de vida (o una de sus fases, suministro y/o servicios de aguas residuales). Este hallazgo contraevidente expuesto en (Vieira *et al.*, 2014, p. 23) se muestra en la figura 1.

(Vieira *et al.*, 2014) afirman que, en los estudios teóricos revisados, la mediana de la intensidad energética (0,20 kWh/m³) fue considerablemente menor que la descrita en los estudios empíricos (1,40 kWh/m³), debido a que las evaluaciones teóricas de la intensidad energética no pueden considerar suficientemente la energía utilizada para el arranque de la bomba y el modo de espera, así como la verdadera eficiencia energética del motor y la bomba. Al comparar los SCALL con los sistemas convencionales de suministro de agua de la ciudad, los estudios empíricos revisados mostraron

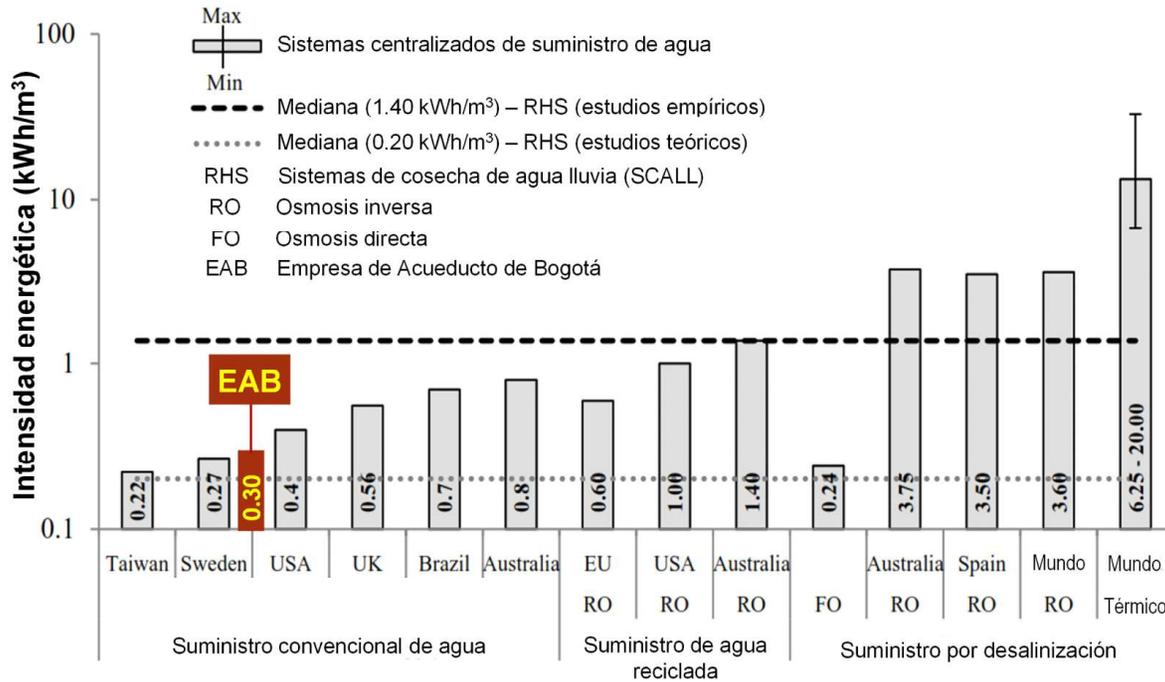


Figura 1. Comparación de la intensidad energética entre los sistemas de suministro centralizados y los SCALL (RHS)

Fuente: adaptado de (Vieira *et al.*, 2014, p. 23).

que los SCALL tienden a consumir tres veces más energía.

Los estudios teóricos, experimentales y empíricos han proporcionado pistas importantes para mejorar la eficiencia energética de los SCALL, que incluyen:

- El uso de tanques de cabecera para mejorar el rendimiento de los sistemas de bombeo al reducir el número de arranques de la bomba y ajustar el caudal al mejor punto de eficiencia (Sharma, Begbie y Gardner, 2015, pp. 127-149).
- El uso de bombas de baja presión para reducir la energía total incorporada al agua de lluvia (Tjandraatmadja, Retamal, Umapathi y Hauber-Davidson, 2015).
- El uso de diámetros de tubería más grandes para reducir las pérdidas por fricción.

- d. El uso de suministro directo de agua de lluvia con almacenamiento de agua de lluvia en tanques de cabecera y distribución por gravedad sin bombeo ([Angrill et al., 2012](#)).
- e. El aumento de la demanda de agua de lluvia para reducir la intensidad energética asociada con el modo de espera y el arranque de la bomba.
- f. Para edificios de varios pisos, los arreglos de sistemas multitanques en cascada de cosecha de agua lluvia (SMTCCALL) que disminuyen la cantidad de volumen de agua de necesario bombeo, al alimentar los tanques y suministrar por gravedad a los distintos usos ([Sendanayake, 2010](#)).

Sin embargo, en última instancia, son las características locales –como la oferta y la demanda de agua de lluvia, el tipo de edificio (de una sola planta o de varias plantas), el diseño de subsistemas SCALL, el diseño del sistema de plomería de agua potable, la intensidad de la energía del agua de la ciudad, entre otros factores– las que determinarán si los rendimientos ambientales y económicos de los SCALL son aceptables. Es decir, el mejoramiento de la eficiencia de los SCALL sigue siendo un traje diseñado a la medida del usuario.

Por tal razón, es menester analizar las características locales que son determinantes para la valoración de potenciales de eficiencias energéticas y de ahorro de agua; así, entonces, la oferta de agua lluvia en Bogotá está sujeta en gran medida a los determinantes climáticos del bosque tropical andino contiguo a la selva del Amazonas, la cual determina las cantidades de lluvia conjuntamente con los fenómenos que produce la Oscilación Sur (ENSO) de El Niño y La Niña, pues, la selva del Amazonas produce el efecto de bomba biótica ([Makarieva y Gorshkov, 2007](#), [Makarieva, Gorshkov y Li, 2009](#)). En esta, por su evotranspiración, la cuenca selvática produce un río ascendente, mucho más grande en caudal, que el de su escorrentía en el suelo. La succión de esta bomba biótica está orientada a la masa de aire húmedo del océano Atlántico, que trae consigo el polvo del desierto del Sahara, rico en fósforo, que fertiliza la masa biótica amazónica, como lo evidencia la investigación espacial de la ([ScienceAtNASA, 2015](#)).

Este fenómeno de la bomba biótica incide directamente sobre las precipitaciones de la cuenca oriental de los Andes colombianos y del piedemonte llanero, como afirman ([Bunyard y Herrera, 2012](#)). En consecuencia, la ciudad de Bogotá posee un régimen bimodal de precipitaciones frecuentes con mínimos mensuales multianuales que superan los 30 mm y como promedio superan los 60 mm ([Climate-Data.org, 2019](#)). El aprovechamiento de esta bomba biótica amazónica determina al diseño dimensional y energético de los SCALL de la ciudad de Bogotá y sus zonas aledañas, alejándolo de los parámetros y disposiciones convencionales previstos en los diseños de otras latitudes; pues, como producto de esta bomba biótica se puede obtener caudal de agua y cabeza hidráulica (energía) disponible en la atmósfera durante gran parte del año. Este potencial puede ser aprovechado de mejor manera por los sistemas de cosecha de agua lluvia multitanque en cascada, alimentados por gravedad. Estos sistemas podrían coadyuvar a intensificar el nexo agua/energía en las zonas rurales

propias y circundantes a Bogotá, proveyendo con alta eficiencia el recurso hídrico necesario de los biodigestores residenciales rurales de las fincas agropecuarias de pequeña escala (Ladino Tamayo, Martínez Rojas y Buriticá-Arboleda, 2018).

Todo este panorama justifica el desarrollo de fuentes alternativas distribuidas de provisión de agua, en especial de agua lluvia que desplace el uso de agua potable donde no sea necesaria, sobre todo en los ámbitos urbanos y de ruralidad colindante a la ciudad. Para ello, este artículo propone el desarrollo de una tecnología para la cosecha eficiente e inteligente de agua lluvia en condiciones urbanas de la ciudad de Bogotá, a través de un prototipo denominado *sistema inteligente en cascada para la cosecha de agua lluvia* (SICCALL).

Método

El enfoque tradicional del ahorro de energía o de insumos, para las variadas actividades de los diferentes sectores de la producción y demanda de bienes y servicios, puede conducir a subestimar el valor total de la eficiencia en economías individuales o sectoriales, locales, regionales, nacionales e internacionales. Por ello, para el presente trabajo se parte conceptualmente de considerar al agua lluvia como un recurso distribuido, tanto de agua como de energía. Este se realiza dentro de una cadena de suministro como un servicio energético, susceptible de autoprovisión del lado de la demanda (Buriticá-Arboleda *et al.*, 2020, p. 63); bajo este concepto se adapta el enfoque ascendente (*bottom-up*), contenido en la metodología analítica, para estudios de potencial de eficiencia energética, utilizada en el Plan de Acción Nacional para la Eficiencia Energética (NAPEE por sus siglas en inglés) en los Estados Unidos y preparada por (Mosenthal & Loiter, 2007), y se integra con el enfoque *de captura de múltiples beneficios* de la eficiencia energética, de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2014).

La adaptación mencionada se centra en tres aspectos: a) trabajar la eficiencia del lado de la demanda y no de la oferta, manifiesta en decisiones y medidas de repuesta de la demanda al mercado de bienes y servicios; b) prever los ahorros de agua potable y su sustitución por agua lluvia; y c) prever los ahorros de energía embebida del servicio centralizado de acueducto a través de su sustitución por la energía que porta el agua lluvia y su correspondiente abatimiento de GEI.

De otra parte, para la aplicación de la metodología de potenciales de eficiencia, se prevé comenzar con los ahorros y costos asociados al mejoramiento en el uso del agua potable a nivel residencial; partiendo del cambio de hábitos, luego el cambio tecnológico y, por último, la innovación con un sistema multitanque en cascada, para la cosecha inteligente de agua lluvia. Este es el denominado *enfoque ascendente*, recomendado para los análisis residenciales, dada la disponibilidad de información y mayor homogeneidad de infraestructura e inventario de equipos a los que se aplican las medidas. El otro enfoque que se integra, el de la captura de múltiples beneficios de la eficiencia, acerca más a comprender el valor real de la eficiencia como recurso clave para el desarrollo económico y

Tabla 1. Datos del usuario

Inmueble		Suba		(correspondencia)		Batan	
Estrato:		5		Clase de uso:		Residencial	
Unidad habitacional familiar:		1		Unidad no habitacional:		0	
Zona:	1	Ciclo:	Q1	Ruta:	Q11626		
Datos del medidor							
Marca:	Watertech Italia	Tipo:	VELO015T2	Diámetro:	½"		
Facturado con:		Consumo normal		Descargue fuente alterna		0	

Fuente: elaboración propia.

social (IEA, 2014), que va más allá de la evaluación económica y financiera de un proyecto privado de inversión, al identificar y medir los impactos de la eficiencia energética en múltiples aspectos y descubrir muchos beneficios del nexo bidireccional agua/energía.

Por tanto, la metodología planteada para estudiar los impactos del prototipo de cosecha inteligente de agua lluvia, en la mejora de la eficiencia energética en una vivienda unifamiliar de Bogotá, adaptada de (Mosenthal & Loiter, 2007), e (IEA, 2014), divide el proceso en cinco pasos, como se detallan a continuación:

Elaboración de la línea de base

Consiste en identificar el pronóstico del consumo de agua potable y su energía embebida, en la vivienda unifamiliar, que se tomará como referencia para evaluar los ahorros y mejora en la eficiencia energética; incluyendo una comprensión específica de lo que es y lo que no incluye, en términos de cambios futuros a códigos y estándares, programas de eficiencia planificados, entre otros. La vivienda unifamiliar se ubica en Bogotá, con altitud promedio por encima de 2000 m s. n. m., lo que le regula un nivel de consumo básico de 11 m³/suscriptor/mes. La tabla 1 muestra los datos del usuario, según la factura de la EAB.

En la unidad habitacional familiar residen 4 personas, es de 2 plantas con altura máxima de 10 m, tiene aproximadamente 50 años de construida y cuenta con los servicios de acueducto y alcantarillado estándares para su tipo.

- *Información histórica del consumo de agua potable.* Se cuenta con el registro histórico de 2 años de la facturación bimensual del servicio de acueducto y alcantarillado, proporcionado por la EAB, desde enero de 2012 a diciembre de 2014; tal como se muestra en la figura 2.
- *Pronóstico del consumo de agua potable como línea de base o de referencia.* El pronóstico, como una forma de prever o predecir los consumos futuros de agua potable en la vivienda unifamiliar, se

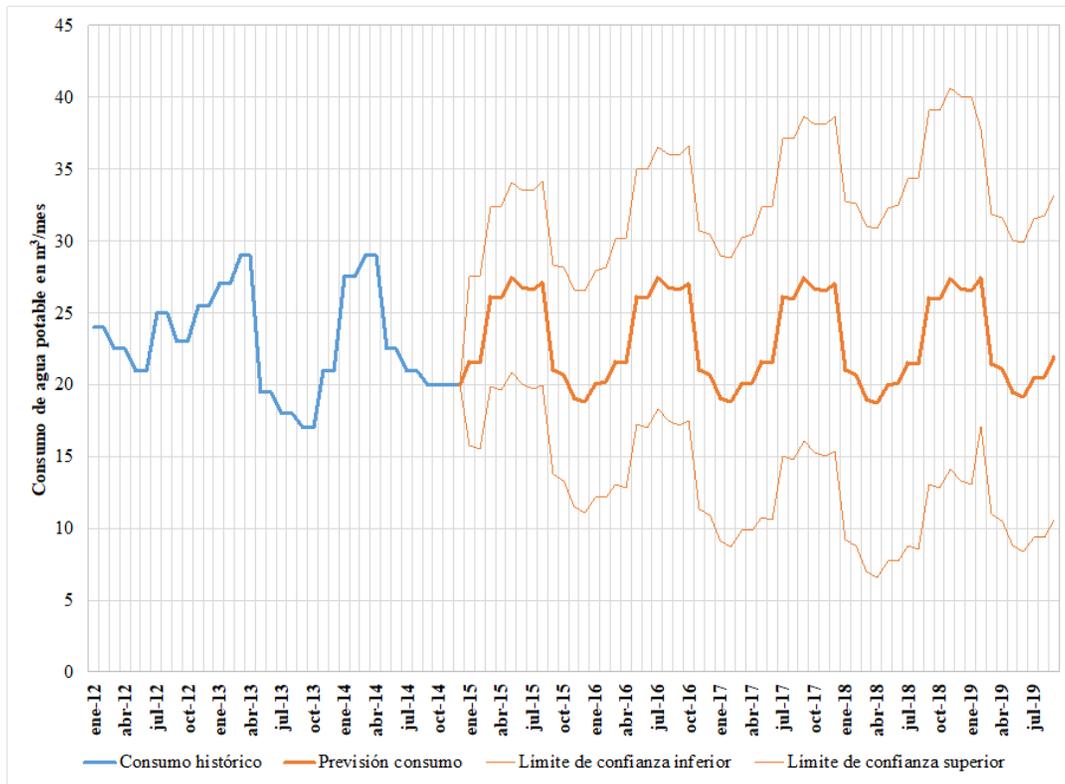


Figura 2. Línea base del consumo de agua potable en la vivienda unifamiliar de Bogotá

Fuente: elaboración propia.

elabora a partir de la información histórica y de algunas consideraciones adicionales en torno a la llamada *eficiencia natural*, que agrega a los pronósticos algunos ahorros de agua potable, con el fin de tener una línea de base más adecuada. La eficiencia natural, entendida como las acciones y medidas que influyen en los ahorros en ausencia de incentivos programáticos (Mosenthal & Loiter, 2007), es una realidad en usuarios finales que, con los recursos disponibles, reaccionan a tarifas, precios, problemas ambientales, calidad de los servicios; como un mecanismo de respuesta de la demanda al sector de bienes y servicios, especialmente a los de servicios públicos domiciliarios.

En la figura 2, puede observarse la proyección de los consumos de agua potable de la vivienda unifamiliar, elaborada para el periodo comprendido entre enero de 2015 y enero de 2019. En la eficiencia natural se incluyeron medidas como: cambio de hábitos y costumbres, en el uso final del agua potable (como cambio a riego por goteo, disminución del tiempo de ducha, entre otros) y de otros recursos energéticos y la reposición natural de tuberías y dispositivos, obsoletos e ineficientes, como tuberías de hierro, inodoros y lavamanos. Se destaca la evidente

estacionalidad en el consumo de agua potable, que refleja circunstancias particulares periódicas, procesos y situaciones cíclicas, de la actividad cotidiana de los residentes en la unidad habitacional.

- *Pronóstico de energía embebida y su huella de carbono.* El pronóstico de energía embebida del agua potable suministrada a la vivienda se calcula a partir de información suministrada por la EAB; para ello se adopta el valor del año 2014 de intensidad energética y de intensidad de emisiones como constante para los años inferiores a este, y el valor del año 2015 para los años superiores (tabla 2). Con la proyección de agua potable y estos indicadores se calculan los valores de la energía embebida y su impacto de emisiones de GEI, que se constituyen en la línea de base para calcular los ahorros energéticos y de mitigación de emisiones de GEI, debidos a la implementación del prototipo SICCALL.

Tabla 2. Indicadores de intensidad energética y de emisiones de GEI-EAB

Descripción	2014	2015
Consumo de energía eléctrica de la red en kWh	170 979 467	149 097 178
Agua potable producida/año en m ³	495 480 302	495 863 171
Intensidad energética en kWh/m ³	0,345	0,301
Intensidad de emisiones de GEI en kg CO ² e/m ³ de agua potable producida	0,078	0,073

Fuente: elaboración propia a partir de (EAB, 2014, EAB, 2015).

Desglose del pronóstico de referencia

Este aplica para otros usos finales y en bienes y servicios sustitutos, apropiados para el análisis. En la tabla 3, columna 2, se relaciona el desglose del consumo de agua potable en la vivienda multifamiliar, en usos finales; en la columna 3, se indican aquellos usos que pueden ser sustituidos por agua lluvia.

Por tanto, se estima que un 56 % del consumo de agua potable suministrada por la EAB puede ser sustituido por el agua lluvia cosechada a partir del prototipo SICCALL.

Caracterización de las medidas de eficiencia

Para este proyecto se prevé la sustitución de hasta un 56 % del consumo de agua potable proyectado, por la cosecha inteligente de agua lluvia, descrito a continuación como el prototipo SICCALL (figura 3).

Tabla 3. Usos del agua potable en el consumo total, en la vivienda multifamiliar

Uso	% uso final agua potable	% a sustituir con agua lluvia
Lavado de ropa	27,1	27,1
Ducha	20,9	-
Sanitarios	19,9	19,9
Lavaplatos	15,5	-
Aseo de vivienda	4,9	4,9
Consumo propio	3,9	-
Lavamanos	3,7	-
Riego de jardines	1,9	1,9
Lavado de auto	1,5	1,5
Riego de plantas	0,7	0,7
Total	100	56

Fuente: elaboración propia a partir de (Junca Salas, 1999).

- a. El prototipo SICCALL fue diseñado para las características de una vivienda existente, respondiendo con sus particularidades a las oportunidades y restricciones. Aunque es un traje a la medida, tiene la propiedad de ser generalizable, replicable y escalable, en virtud de sus principios físicos y energéticos funcionales, de carácter universal. Sin embargo, sus atributos de máxima eficiencia fueron optimizados para las condiciones de pluviosidad bimodal de Bogotá.
- b. El principio universal que rige el diseño del prototipo SICCALL es la ley de conservación de energía que toma expresión particular en los fluidos como las leyes de Bernoulli y la de continuidad. La aplicación de la primera ley determina las alturas energéticas potenciales y dinámicas del fluido, que permiten diseñar el sistema multitanques, para proveer presión y volumen adecuados para los distintos usos del agua lluvia. La ley de continuidad del fluido permite diseñar las conexiones y depósitos reduciendo las pérdidas de manera que el sistema pueda ser energoeficiente. De esta manera se puede proveer, por gravedad, hasta un 45 % del uso total de agua en la vivienda objeto de este prototipo.
- c. El prototipo SICCALL está compuesto de los siguientes sistemas funcionales (figura 3):
 - *Acopio y captación de agua lluvia.* Organiza la oferta de agua lluvia disponible en la residencia, para asegurar el abastecimiento en términos de calidad del agua, presión y continuidad (volumen en el tiempo) a un costo sostenible. Este sistema dispone de los subsistemas

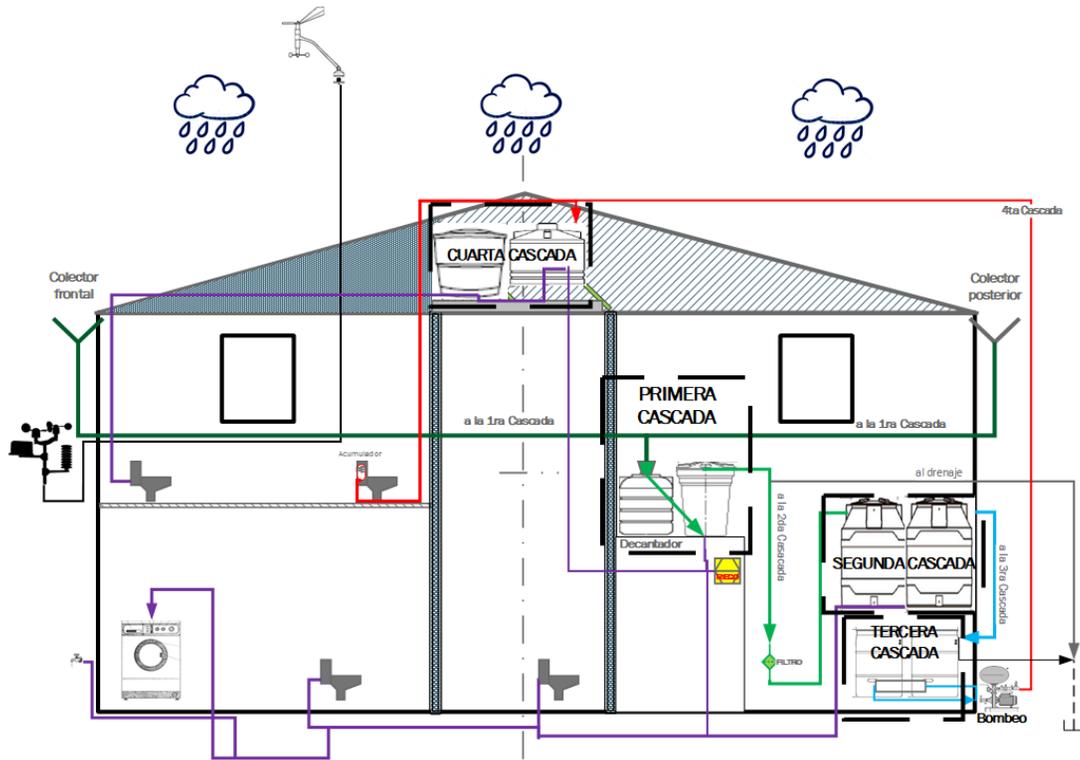


Figura 3. Esquema del prototipo sistema inteligente en cascada para la cosecha de agua lluvia (SICCALL)
Fuente: elaboración propia.

de captación, filtración y almacenamiento de agua decantada.

- *Almacenamiento de agua lluvia.* Almacena el agua lluvia filtrada para diferir en el tiempo los caudales y volúmenes almacenados, llevándolos y concentrándolos en un sistema multi-tanques de 4 cascadas, cuya operación se rige por el algoritmo de desempeño *yield after spillage* (YAS), el cual es un modelo conductual genérico para los sistemas de cosecha de agua lluvia, cuyas variables son: la demanda anual (D), la capacidad de almacenamiento (S), el área colectora (A) y el promedio anual de lluvia (R); en ecuaciones que son formuladas para determinar la cantidad de la lluvia colectada que debe ser bombeada a cada piso o a cada tanque en su respectivo nivel, logrando un desempeño de sistema dinámico para eficiencia energética del agua cosechada (Sendanayake, 2016). La cuarta cascada la constituye un sistema presurizado de suministro al tanque de cabecera y al inodoro de acumulación de presión y bajo consumo de agua (ver figura 3).
- *Distribución para usos convencionales.* Su función es transportar y distribuir el agua lluvia a los puntos de consumo, en la calidad, volumen y presión especificados con la mayor continuidad posible, a costos razonables.

- *Extracción de aguas residuales.* Su función es recolectar y extraer los caudales de aguas grises o negras y excedentarias de lluvias que sean desalojadas por los desagües de cada equipo o dispositivo utilizado.
 - *Sistema de supervisión, control y vigilancia.* Se compone de tres subsistemas: el de monitoreo climático, compuesto por una estación meteorológica con capacidad predictiva de lluvias; el de control electromecánico, que controla el encendido de la bomba en función de los niveles de los tanques de la tercera y cuarta cascada; y el inteligente de control, que consta de procesamiento continuo de datos de sensores y actuadores para la toma de decisiones de gestión del prototipo.
- d. La operación del SICCALL prevé la recogida del agua lluvia mediante dos colectores (canales) adosados al techo de la vivienda, que conducen a sendas tuberías a través de la primera cascada a un filtro de autolavado y un decantador de doble volumen, los cuales recogen las impurezas gruesas del agua lluvia. Posteriormente, por rebose en el decantador, el agua lluvia se dirige a un tanque de almacenamiento de la primera cascada; este, por gravedad, alimenta los servicios ubicados en el primer piso de la vivienda. El agua rebosante de este tanque se dirige a un filtro de partículas finas conformado por carbón activado, grava y arena, que se encarga de la limpieza final del agua lluvia; y por gravedad, la lluvia es conducida a los tanques de almacenamiento de la segunda cascada, los cuales están diseñados para ser el principal receptáculo de almacenamiento del sistema (1,2 m³).

Estos tanques alimentan, por gravedad, a la carga de dos inodoros, al servicio de lavado de ropa, jardines y áreas de limpieza, ubicadas en el primer piso de la vivienda. El rebose de los tanques de la segunda cascada dirige el agua hasta los tanques inferiores de la tercera cascada, los cuales son el sistema de alimentación del sistema hidroneumático de bombeo. Este sistema está conformado por una bomba de 0,5 hp, con capacidad para alimentar a los tanques de la cuarta cascada con un caudal de 35 L/s, ubicados a 8 m de altura, en el entretecho de la vivienda.

Dicha bomba operada aisladamente del balón hidroneumático eleva 1 m³ en 28 min de operación, lo cual da como resultado una intensidad energética teórica de 0,071 kWh/m³, que correspondientemente, al consumir energía de la red eléctrica, tendría una intensidad teórica de emisiones de GEI de 0,015 kg CO₂e/m³, estos valores están considerados para el caso extremo de operación del sistema; que se presenta cuando el tanque hidroneumático no está disponible y el tanque de cabecera debe suplir las necesidades de la vivienda. La cuarta cascada alimentada por el sistema hidroneumático, que opera a presiones entre 26 y 40 psi, suministra agua lluvia a dos tanques y a un acumulador de presión inserto en uno de los inodoros eficientes del segundo piso de la vivienda. El segundo inodoro es alimentado por gravedad, por los tanques de cuarta cascada. Además, estos tanques operan como tanques de cabecera cuando la reserva de agua se agota para el primer piso.

Tabla 4. Etapas e hitos del desarrollo del prototipo SICCALL

Etapa	Hitos	Fecha de inicio y final	Intensidad energética kWh/m ³	Uso de bombeo	Volumen instalado m ³
Et.I	Instalación primera cascada	de enero 2015 a dic 2018	0	No	0,5
Et.II	Instalación tercera y (cuarta cascada); y sistema control electromecánico	de enero 2019 a agosto 2019	0,07	Si	0,4 y (0,25)
Et.III	Instalación segunda cascada y (ampliación cuarta cascada)	de septiembre 2019 en adelante	0,07	Parcial, solo para tanque de cabecera	1,2 y (0,35)
Capacidad del SICCALL en volumen total instalado					2,7

Fuente: elaboración propia.

Valoración de los resultados de beneficios múltiples

Esta es pertinente, ya sea que dichos resultados sean directos o indirectos, por la implementación del prototipo SICCALL. Para entender esta valoración es necesario especificar los hitos y etapas del desarrollo, que el prototipo ha experimentado hasta la fecha (tabla 4).

Los resultados obtenidos de la implementación del prototipo SICCALL, en sus etapas de desarrollo, se muestran en la figura 4, para el ahorro concerniente al consumo de agua potable; además, allí se evidencian situaciones de no provisión de agua lluvia, debido a la conjunción de eventos de estrés climático ocurridos en el fenómeno de El Niño del 2015-2016, y la falta de capacidad de almacenamiento del prototipo, en su etapa inicial.

La evolución del ahorro de la energía embebida en el agua potable suministrada por la EAB (figura 5), durante la primera etapa de desarrollo del prototipo, es prácticamente similar al ahorro del consumo de agua potable, debido a que el suministro de agua lluvia provisto por el prototipo se efectuó exclusivamente a gravedad (sin bombeo). El desempeño de la segunda etapa a partir del inicio de 2019 operó el bombeo hacia el tanque de cabecera, el cual suministró preferentemente los servicios a los usos desplazados de agua potable. En consecuencia, es evidente la diferencia de áreas de ahorro (ralladas) entre el consumo de agua potable y la energía embebida, a partir de diciembre de 2018.

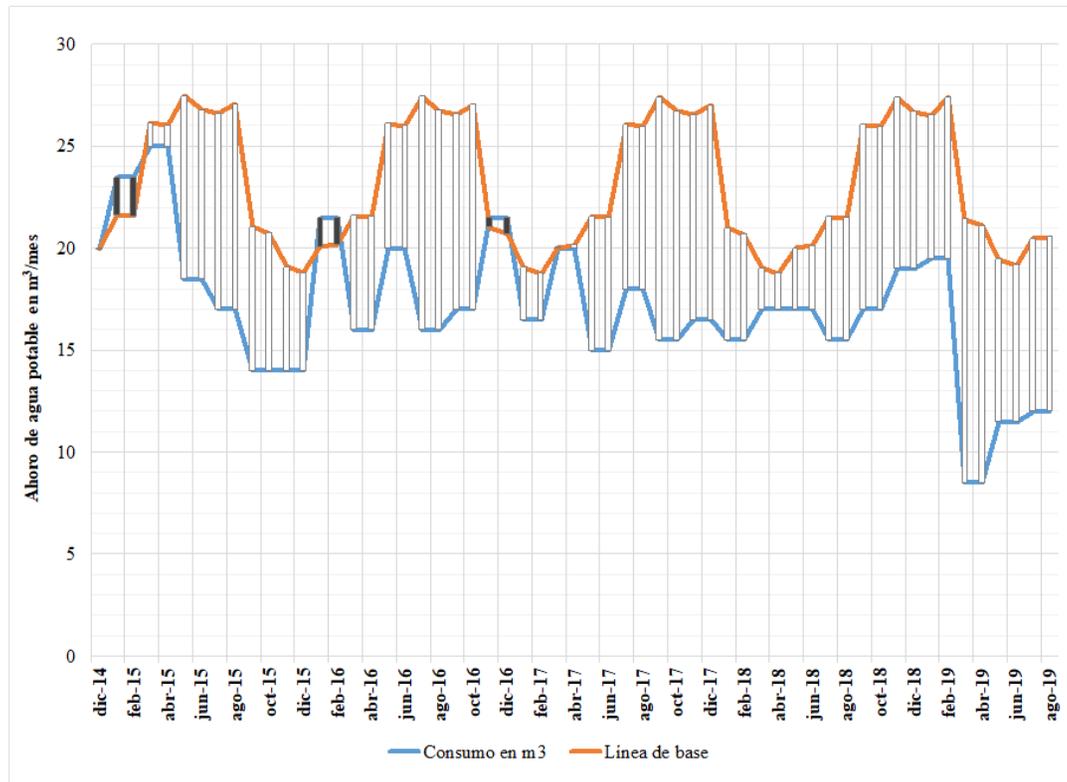


Figura 4. Evolución de los ahorros en el consumo de agua potable

Fuente: elaboración propia.

Medición de los efectos económicos y otros efectos de recursos

Los efectos económicos de la implementación del prototipo SICCALL parten del ahorro del agua potable y sus implicaciones, durante la explotación del prototipo en sus primeras fases, que se muestra en la figura 6. El ahorro en las primeras etapas de implementación del prototipo manifestó estacionalidad congruente con las condiciones de pluviosidad, puesto que reprodujo la escasez del fenómeno de El Niño 2015-2016; esto se explica en que el volumen útil del acopio de agua no fue suficiente para diferir en el tiempo su servicio.

En la figura 7 se muestra el costo unitario del servicio de agua potable de la EAB, el cual varía en el periodo de los cinco años estudiados, en aproximadamente un 25%. Esta tarifa se convierte a su vez, en la de sustitución del agua potable por agua lluvia, la cual determinará en última instancia la relación costo/beneficio, ya que dicha tarifa define los ingresos, al afectar los flujos de ahorro.

La tabla 5 recoge los resultados totales de la evaluación del prototipo, durante el periodo de estudio 2015-2019 (56 meses), donde se obtuvo promedio mensual de sustitución de agua potable de 6 m³, lo que representa aproximadamente el 50% del potencial de diseño del prototipo SICCALL.

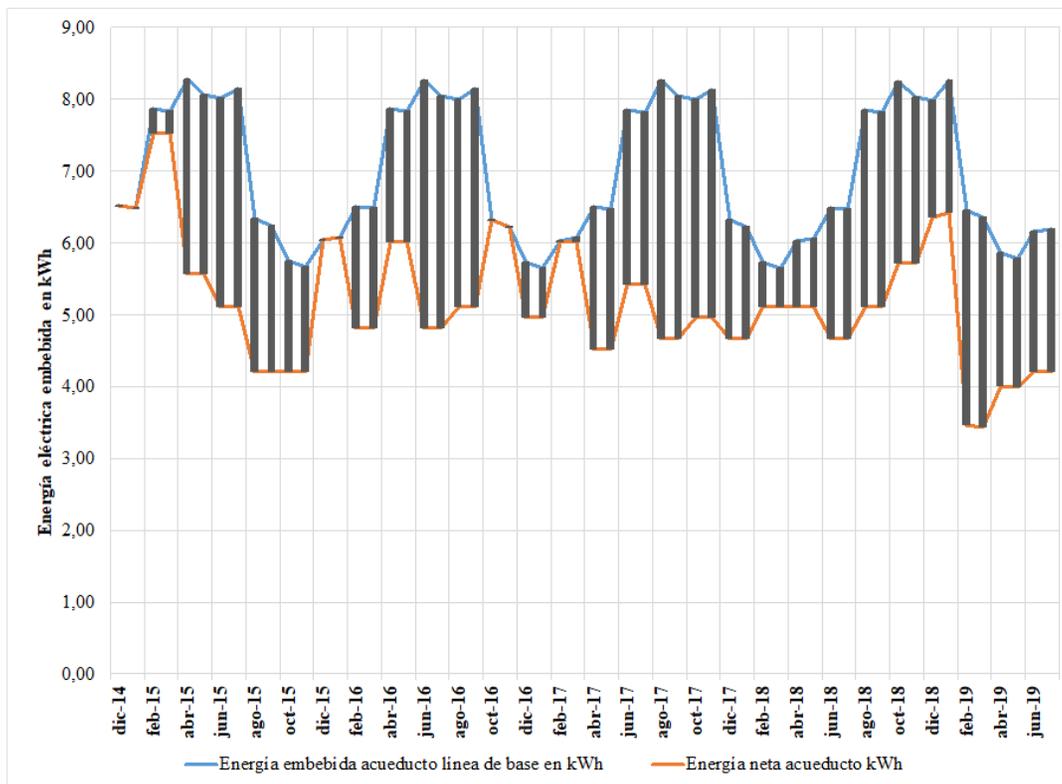


Figura 5. Evolución del ahorro de la energía embebida en el agua potable, suministrada por la Empresa de Acueducto de Bogotá (EAB)

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, permite observar la interdependencia entre las cantidades relativas de agua potable ahorrada (26 %), energía embebida ahorrada (25 %) y abatimiento de GEI en un 27 %, con respecto de la línea de base.

Los valores dinerarios de ingreso para cada uno de estos productos de la eficiencia hídrica y energética fueron calculados para las partes interesadas de usuario/propietario del prototipo y EAB, entidad promotora de programas de ahorro de agua y gestora de la demanda agregada.

Discusión de resultados

El periodo de análisis de este estudio, que comprende las etapas I y II (48 y 7 meses, respectivamente), arroja resultados que impactan los indicadores principales de eficiencia de consumo de agua potable, en 26 %; de disminución de la energía embebida en el agua potable, en 25 %, y por ende, de abatimiento de emisiones de GEI, en 27 %. Es destacable que estos indicadores de eficiencia se logran

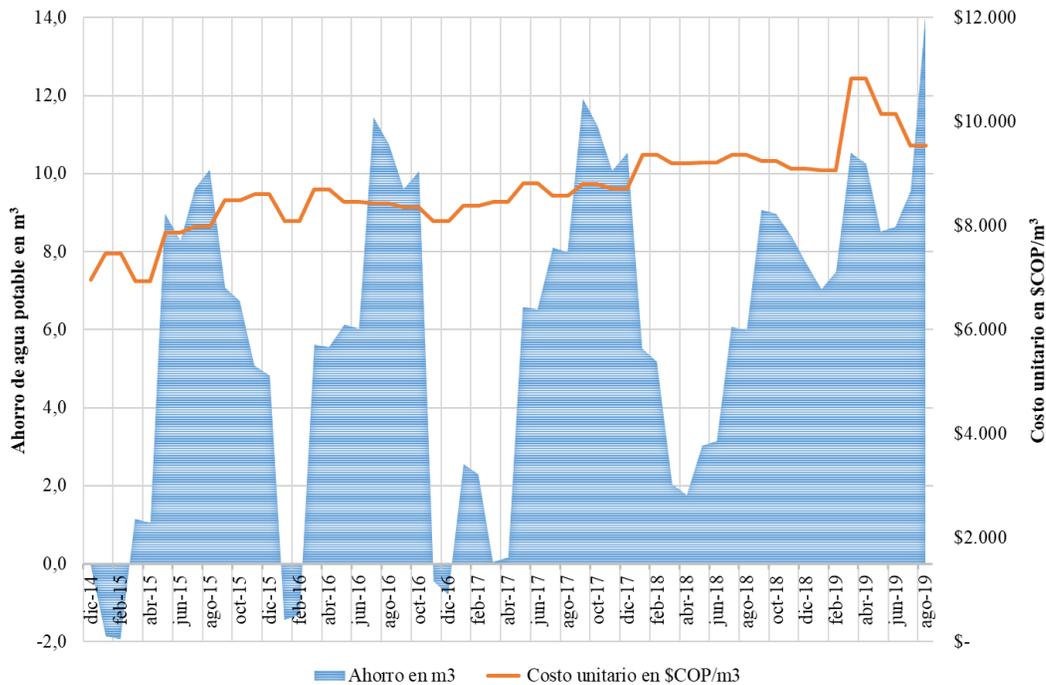


Figura 6. Evolución del ahorro de agua potable, a partir del prototipo sistema inteligente en cascada para la cosecha de agua lluvia (SICCALL)

Fuente: elaboración propia.

con un factor de instalación del volumen nominal del sistema del 19 % (etapa I), el cual sube a 46 % en la etapa II; que en promedio ponderado equivale a 22,4 %. Es de esperar que cuando el prototipo logre su pleno volumen nominal y con la instalación del sistema de control inteligente, aumente ostensiblemente los indicadores de eficiencia descritos anteriormente. Este resultado es de gran importancia para el usuario, la EAB y el regulador, pues son una forma sostenible de lograr elevar las eficiencias y abatir emisiones de GEI; así como su incidencia en las futuras ampliaciones del sistema de suministro de agua para la ciudad.

Los valores absolutos de ahorro del volumen de agua potable –calculados en 338,4 m³, abatimiento de GEI de 25 kg y de ahorro de la energía embebida en el agua potable de 99 kWh– no son aún muy dicientes de su verdadero potencial, ya que el prototipo SICCALL se desempeñó con un factor de instalación solo de 22,4 % de su capacidad nominal, durante el periodo de este estudio.

Los ingresos dinerarios, redituables al prototipo SICCALL mostrados en la tabla 5, por un monto total de COP 3 084 298 en el periodo de estudio de 56 meses, podrían tener una distribución según la parte interesada de la siguiente manera hipotética: a) el usuario/propietario recibiría el 98,3 % por concepto de la sustitución de agua potable, lo que le permitiría el retorno de la inversión durante el

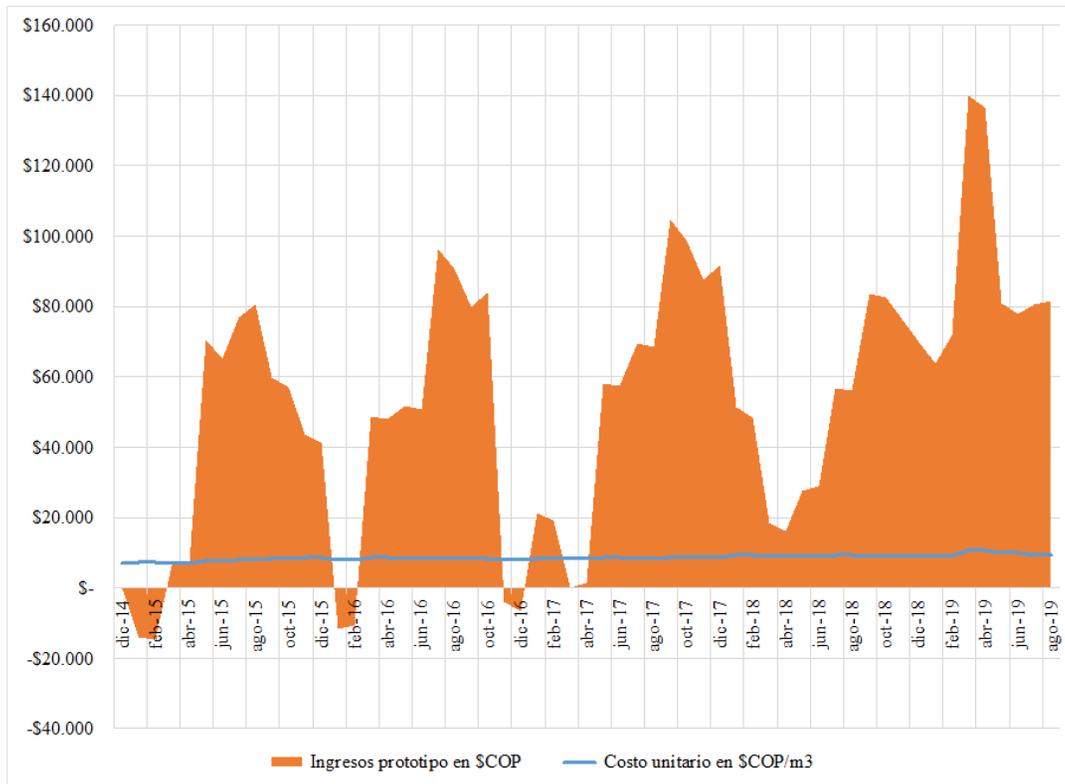


Figura 7. Ingresos del prototipo sistema inteligente en cascada para la cosecha de agua lluvia (SICCALL), por agua potable sustituida

Fuente: elaboración propia.

periodo de estudio; b) la EAB podría haber generado un programa de implementación de SCALL eficientes, para el abatimiento de GEI y participado en los mercados de carbono a través de los CRE, organizado bajo los mecanismos del protocolo de Kioto, con ello habría obtenido el 0,03 % de los ingresos dinerarios del prototipo. Con este programa, la EAB habría percibido un ahorro en su insumo energético que representa 1,64 % del total de ingresos dinerarios arrojados por el prototipo; c) el Distrito Capital de Bogotá, al impulsar como política el desarrollo del programa de SCALL eficientes alejaría la necesidad de ampliación de la capacidad del acueducto de Bogotá para garantizar la seguridad y confiabilidad del suministro de agua y energía. Además, considerando una penetración de SCALL eficientes, en un 30 % de las viviendas NPH (no propiedad horizontal) de Bogotá (DANE, 2020), el Distrito Capital contabilizaría un ahorro energético de 3092,49 MWh y abatiría 977,28 tCO₂eq durante un periodo de 60 meses de implementación del programa.

Tabla 5. Resultados de efectos económicos y de otros recursos en el periodo 2015-2019

Total ingresos del usuario del prototipo por sustitución de agua potable (COP)	Total ingresos de EAB por abatimiento de GEI en COP (calculado para créditos de carbono (CER))	Total ingresos por ahorro energético de EAB en COP (calculado para la tarifa oficial industrial)
COP 3 032 640	COP 1132	COP 50 526
Volumen de agua potable de la línea base m ³	Huella de carbono del suministro de agua potable kg CO ₂ eq	Energía embebida del agua potable kWh
1314,4	94,5	390
Volumen de agua potable ahorrada por el prototipo m ³	Abatimiento de GEI del prototipo kg CO ₂ eq	Ahorro energético del prototipo kWh
338,4	25	99
% de sustitución del agua potable	% de abatimiento de GEI en CO ₂ eq por el prototipo	% de energía embebida en el agua potable ahorrada
26	27	25

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

La lluvia como recurso distribuido puede ser valorado tanto como recurso hídrico y energético, y así constatar la gran potencialidad de este recurso en Bogotá. Las metodologías de estudio de la eficiencia energética son adaptables para evaluar el ahorro de recursos que poseen, en forma embebida, la energía de servicios energéticos como el agua potable. Para este caso de estudio, la comparación de las intensidades energéticas de las actividades de suministro y sustitución, fueron un indicador útil para desarrollar la evaluación comparativa de la eficiencia. El diseño tarifario del suministro de agua potable y alcantarillado, así como las restricciones de participación de la demanda en mercados de energía eléctrica, le impiden a los usuarios finales y a la sociedad en general la captura de los beneficios económicos derivados de la implementación de los sistemas de cosecha de aguas lluvias (SCALL). Sin embargo, el análisis del prototipo muestra la recuperación de la inversión a partir de los ahorros producidos por la sustitución de agua potable.

Los resultados iniciales obtenidos permiten inferir sobre los potenciales beneficios individuales, sociales y ambientales de la implementación de políticas conducentes a estimular esta modalidad de gestión de la demanda de agua, a través de recursos distribuidos de agua y energía como la lluvia.

Esto debido a que las autoridades administrativas de la ciudad podrían adelantar programas promotores de la eficiencia de agua y energía a través de inversiones en SCALL eficientes, por parte de los usuarios y partes interesadas, de manera que los recursos distribuidos tanto de agua lluvia, sol, viento y otros, bajo una economía red o colaborativa, rindieran los efectos de escala de beneficios significativos para los individuos, la sociedad y el planeta, convirtiendo a estos programas en programas meritorios de la futura “Bogotá, ciudad inteligente y eficiente”.

References

- [Acosta Alarcón, Rodríguez y Kua, 2019] Acosta Alarcón, R., Rodríguez, J. P. y Kua, H. W. (2019). Voluntary management of residential water demand in low and middle-low income homes: a pilot study of Soacha (Colombia). *Water*, 11(2), 216. DOI <https://doi.org/10.3390/w11020216> ↑Ver página 175
- [Agatón, Ruiz y Sayago, 2016] Agatón, A. L., Ruiz, J. C. C. y Sayago, U. F. C. (2016). Review of the status of art collection and utilization of rain water in urban and airports. *Tecnura*, 20(50), 141-153. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.11567> ↑Ver página 174
- [Angrill *et al.*, 2012] Angrill, S., Farreny, R., Gasol, C. M., Gabarrell, X., Viñolas, B., Josa, A. y Rieradevall, J. (2012). Environmental analysis of rainwater harvesting infrastructures in diffuse and compact urban models of Mediterranean climate. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(1), 25-42. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0330-6> ↑Ver página 177
- [Bunyard y Herrera, 2012] Bunyard, P. y Herrera, F. (2012). El rol de la selva amazónica en la formación de las lluvias en Colombia. *Intekhnia*, 7(1), 27-36. ↑Ver página 177
- [Buriticá-Arboleda, Ramírez-Escobar y Álvarez-Bel, 2019] Buriticá-Arboleda, C. I., Ramírez-Escobar, C. A. y Álvarez-Bel, C. (2019). *La seguridad de abastecimiento eléctrico en mercados liberalizados*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Recuperado de <https://editorial.udistrital.edu.co/detalle.php?id=1166&f=6> ↑Ver página 174
- [Buriticá-Arboleda *et al.*, 2020] Buriticá-Arboleda, C. I., Ramírez-Escobar, C., López Martínez, G., Moreno Ch., R., Martínez S, F. y Aldana M., F. (2020). *Los recursos distribuidos de bioenergía en Colombia*. Bogotá: Universidad Distrital. Recuperado de <https://doctoradoingenieria.udistrital.edu.co/index.php/libroLosRecurDistriBioenerColom> ↑Ver página 178
- [Carragher, Stewart y Beal, 2012] Carragher, B. J., Stewart, R. A. y Beal, C. D. (2012). Quantifying the influence of residential water appliance efficiency on average day diurnal demand patterns at an end use level: a precursor to optimized water service infrastructure planning. *Resources, Conservation and Recycling*, 62, 81-90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.02.008> ↑Ver página 175

- [Climate-Data.org, 2019] Climate-Data.org (2019). *Régimen bimodal de lluvias en Bogotá*. Recuperado de <https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/bogota/bogota-5115/#climate-graph> ↑Ver página 177
- [DANE, 2020] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (mayo 2020). *Históricos Vivienda VIS y no VIS*. Recuperado de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/vivienda-vis-y-no-vis/vivienda-vis-y-no-vis> ↑Ver página 189
- [EAB, 2014] Empresa de Acueducto de Bogotá (EAB) (2014). *Informe de gases de efecto invernadero EAB-ESP año 2014*. Bogotá. ↑Ver página 181
- [EAB, 2015] Empresa de Acueducto de Bogotá (EAB) (2015). *Informe de gases de efecto invernadero EAB-ESP año 2015. Año comparativo No. 1: 2015 con año base: 2014*. Bogotá. ↑Ver página 181
- [] Guide for conducting energy efficiency potential studies (No. 1219674; p. 1219674). National Action Plan for Energy Efficiency (2007). Guide for Conducting Energy Efficiency Potential Studies. Prepared by Philip Mosenthal and Jeffrey Loiter, Optimal Energy, Inc. www.epa.gov/eeactionplan. ↑Ver página
- [García Lirios *et al.*, 2013] García Lirios, C., Carreón Guillén, J., Hernández Valdés, J., Montero López Lena, M. y Bustos Aguayo, J. M. (2013). Actitudes, consumo de agua y sistema de tarifas del servicio de abastecimiento de agua potable. *Polis. Revista Latinoamericana* [En línea], 34. Recuperado de <http://journals.openedition.org/polis/8933><https://doi.org/10.4067/S0718-65682013000100019> ↑Ver página 175
- [Goette, Leong y Qian, 2019] Goette, L., Leong, C. y Qian, N. (2019). Motivating household water conservation: a field experiment in Singapore. *PLoS ONE*, 14(3). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211891> ↑Ver página 175
- [ICONTEC, 2016] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) (2016). *Certificación Carbono Neutro EAA-ESP 2016-2019*. Bogotá. ↑Ver página 175
- [IEA, 2014] International Energy Agency (IEA) (2014). *Capturing the multiple benefits of energy efficiency: a guide to quantifying the value added*. París. DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264220720-en> ↑Ver página 178, 179
- [Junca Salas, 1999] Junca Salas, J. C. (1999). *Determinación del consumo básico de agua potable*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. ↑Ver página 182
- [Ladino Tamayo, Martínez Rojas y Buriticá-Arboleda, 2018] Ladino Tamayo, A. F., Martínez Rojas, J. A. y Buriticá-Arboleda, C. I. (2018). Metodología APRENDYSAGE aplicada a los casos de estudio:

- Briceño (Boyacá) y Cajicá (Cundinamarca). *Tecnura*, 22(57), 13-31. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.13987> ↑Ver página 178
- [Lizcano, Congote y Angarita, 2012] Lizcano, J. A., Congote, B. y Angarita, E. (2012). Exclusión del costo del agua en las tarifas de acueducto: La equívoca responsabilidad ambiental del servicio de acueducto y sus altas pérdidas. *Tecnogestión: Una mirada al ambiente*, 8(1), 24-30. DOI: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tecges/article/view/4380> ↑Ver página 174
- [Makarieva y Gorshkov, 2007] Makarieva, A. M. y Gorshkov, V. G. (2007). Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(2), 1013-1033. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1013-2007> ↑Ver página 177
- [Makarieva, Gorshkov y Li, 2009] Makarieva, A. M., Gorshkov, V. G. y Li, B.L. (2009). Precipitation on land versus distance from the ocean: evidence for a forest pump of atmospheric moisture. *Ecological Complexity*, 6(3), 302-307. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2008.11.004> ↑Ver página 177
- [Manco Silva, Guerrero Erazo y Ocampo Cruz, 2012] Manco Silva, D. G., Guerrero Erazo, J. y Ocampo Cruz, A. M. (2012). Efficiency of residential water consumption. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 11(21), 23-38. ↑Ver página 175
- [Mosenthal & Loiter, 2007] Mosenthal, P., & Loiter, J. (2007). Guide for Conducting Energy Efficiency Potential Studies. (p. 96) [Resource of the NAPEE]. National Action Plan for Energy Efficiency. <https://archive.epa.gov/epa/statelocalclimate/guide-conducting-energy-efficiency-potential-studies.html>. ↑Ver página 178, 179, 180
- [Pérez, Flores, González y Mota, 2019] Pérez, S. E. B., Flores, S. M., González, O. N. y Mota, R. de H. (2019). Implementación del método de escasez en la determinación de la huella hídrica en la zona costera de San Blas, México. *Tecnura*, 23(62), 45-54. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.15796> ↑Ver página 174
- [Ramírez-Escobar, 2012] Ramírez-Escobar, C. A. (2012). *Los precios del mercado mayorista de electricidad como expresión de la participación activa de la demanda: aplicación de la economía experimental*. [Tesis de doctorado]. Universitat Politècnica de València, Valencia. Recuperado de <https://riunet.upv.es/handle/10251/16806?show=full> ↑Ver página 174
- [Ramírez-Escobar, 2007] Ramírez-Escobar, C. R. (2007). El uso racional de la energía desde la percepción de los mercados liberalizados de electricidad: respuesta de la demanda. *Revista Clepsidra*, 3(4), 27-35. Recuperado de <http://revistas.fuac.edu.co/index.php/clepsidra/article/view/264> ↑Ver página 174

- [Retamal, Abeysuriya, Turner y White, 2009] Retamal, M., Abeysuriya, K., Turner, A. y White, S. (2009). *The water-energy nexus: investigation into the energy implications of household rainwater systems*. Sídney: Institute for Sustainable Futures. ↑Ver página 174
- [ScienceAtNASA, 2015] ScienceAtNASA (28 de abril de 2015). ScienceCasts: desert dust feeds Amazon forests [Archivo de video]. YouTube. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=s7lVGhTPQAY> ↑Ver página 177
- [Sendanayake, 2010] Sendanayake, S. (2010). *Development of an optimized integrated rainwater harvesting model for multistorey houses*. [Tesis de doctorado]. University of Moratuwa, Moratuwa. Recuperado de <http://dl.lib.mrt.ac.lk/handle/123/2033> ↑Ver página 177
- [Sendanayake, 2016] Sendanayake, S. (2016). *Rainwater harvesting for urban living*. Sri Lanka: South Asian Institute of Technology and Medicine. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/305380145_RAINWATER_HARVESTING_FOR_URBAN_LIVING ↑Ver página 183
- [Sharma, Begbie y Gardner, 2015] Sharma, A. K., Begbie, D. y Gardner, T. (2015). *Rainwater tank systems for urban water supply*. Londres: IWA Publishing. ↑Ver página 176
- [Stewart, Willis, Panuwatwanich y Sahin, 2013] Stewart, R. A., Willis, R. M., Panuwatwanich, K. y Sahin, O. (2013). Showering behavioral response to alarming visual display monitors: longitudinal mixed method study. *Behaviour & Information Technology*, 32(7), 695-711. DOI: <https://doi.org/10.1080/0144929X.2011.577195> ↑Ver página 175
- [Tijs *et al.*, 2017] Tijs, M. S., Karremans, J. C., Veling, H., De Lange, M. A., Van Meegeren, P. y Lion, R. (2017). Saving water to save the environment: contrasting the effectiveness of environmental and monetary appeals in a residential water saving intervention. *Social Influence*, 12(2-3), 69-79. <https://doi.org/10.1080/15534510.2017.1333967> ↑Ver página 175
- [Tjandraatmadja, Retamal, Umapathi y Hauber-Davidson, 2015] Tjandraatmadja, G., Retamal, M., Umapathi, S. y Hauber-Davidson, G. (2015). Understanding energy usage in rainwater tank systems through laboratory and household monitoring. En *Rainwater tank systems for urban water supply* (pp. 127-149). Londres: IWA Publishing. Recuperado de <https://iwaponline.com/ebooks/book-pdf/521261/wio9781780405360.pdf> ↑Ver página 176
- [Ürge-Vorsatz *et al.*, 2012] Ürge-Vorsatz, D., Eyre, N., Graham, P., Harvey, D., Hertwich, E., Jiang, Y., Kornevall, C., Majumdar, M., McMahon, J. E., Mirasgedis, S., Murakami, S., Novikova, A., Janda, K., Masera, O., McNeil, M., Petrichenko, K., Herrero, S. T. y Jochem, E. (2012). Energy end-use: buildings. En T. B. Johansson, N. Nakicenovic, A. Patwardhan y L. Gomez-Echeverri (eds.), *Global Energy Assessment (GEA)* (pp. 649-760). Cambridge: Cambridge University Press.

https://www.cambridge.org/core/product/identifier/CBO9780511793677A028/type/book_part <https://doi.org/10.1017/CBO9780511793677.016> ↑Ver página 174

[US EPA, 2016] United States Environmental Protection Agency (US EPA) (12 de julio de 2016). WaterSense [Collections and Lists]. Washington. Recuperado de <https://www.epa.gov/watersense> ↑Ver página 175

[Vieira *et al.*, 2014] Vieira, A. S., Beal, C. D., Ghisi, E. y Stewart, R. A. (2014). Energy intensity of rainwater harvesting systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 225-242. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.012> ↑Ver página 175, 176



Una revisión sistemática sobre aula invertida y aprendizaje colaborativo apoyados en inteligencia artificial para el aprendizaje de programación

A Systematic Review on Flipped Classroom and Collaborative Learning Supported in Artificial Intelligence for Programming Learning

Carlos Giovanni Hidalgo Suárez ¹, José Miguel Llanos Mosquera ², Víctor Andrés Bucheli Guerrero ³

Fecha de Recepción: 22 de Noviembre de 2020

Fecha de Aceptación: 01 de Abril de 2021

Cómo citar: Giovanni-Hidalgo, C.G. Llanos-Mosquera, J.M. y Bucheli-Guerrero, V.A. (2021). Una revisión sistemática sobre aula invertida y aprendizaje colaborativo apoyados en inteligencia artificial para el aprendizaje de programación. *Tecnura*, 25(69), 196-214. <https://doi.org/10.14483/22487638.16934>

Resumen

Objetivo: La implementación de estrategias pedagógicas como el aula invertida (AI) y el aprendizaje colaborativo (AC) han contribuido en la enseñanza de programación de computadores. En este sentido, este artículo permite identificar el estado actual de las tecnologías y herramientas basadas en aprendizaje activo y colaborativo, y cómo han apoyado el aprendizaje de la programación, y los aportes que ha generado la inteligencia artificial en este proceso.

Métodología: Se realizó una revisión sistemática bajo la propuesta de Kitchenham para definir las preguntas de investigación, la selección de fuentes de información, el desarrollo de la revisión y el análisis de la información. En el proceso se utilizaron diferentes fuentes de datos y criterios de selección para artículos investigativos y conferencias publicadas entre 2013 y 2020.

Resultados: Se identificó el estado actual del AI y el AC, enfatizando en cómo estas estrategias apoyan el proceso de enseñanza de la programación con métodos educativos y herramientas de *software*. También se identificó el apoyo de la inteligencia artificial en el aprendizaje de la programación a través de diferentes aplicaciones y técnicas computacionales que integran AI y AC.

Conclusiones: Desde la aparición de las herramientas virtuales, la implementación de la inteligencia artificial se ha convertido en una prioridad para la educación virtual, potenciando la forma de entender y comprender las necesidades específicas del estudiante. Las nuevas herramientas y estrategias basadas en inteligencia artificial han contribuido con la gestión y la visualización, donde el docente puede tomar decisiones oportunas del proceso formativo y retroalimentar las actividades desarrolladas en los ambientes de aprendizaje.

¹Ingeniero de sistemas, magíster en Ingeniería, estudiante de doctorado Universidad del Valle. Cali, Colombia. Email: carlos.hidalgo@correounivalle.edu.co

²Ingeniero de sistemas, magíster en Arquitectura de Software, estudiante de doctorado Universidad del Valle. Cali, Colombia. Email: jose.llanos@correounivalle.edu.co

³Ingeniero de sistemas, magíster en Ingeniería y Computación, doctor en Ingeniería. Profesor asociado Universidad del Valle. Cali, Colombia. Email: victor.bucheli@correounivalle.edu.co

Palabras clave: aprendizaje colaborativo, aula invertida, estrategias de aprendizaje, inteligencia artificial, programación de computadores.

Abstract

Objective: Implementing pedagogical strategies such as the Flipped Classroom (FC) and Collaborative Learning (CL) have contributed to the teaching of computer programming. In this sense, this paper allows us to identify the current state-of-the-art techniques based on active and collaborative learning, and how they have supported programming learning, and the contributions that Artificial Intelligence (AI) has generated in this process.

Methodology: Supported by the Kitchenham process, a systematic review was developed, finding the research questions, selecting information sources, the information analysis and processing. Different data sources and selection criteria were used to find research articles and conferences published between 2013 and 2020.

Results: FC and CL current state was identified, emphasizing how these strategies support the teaching process of programming with educational methods and software tools. In addition, it was identified how Artificial Intelligence supports learning programming through different applications and computational techniques that integrate FC and CL.

Conclusions: The novel tools and strategies based on AI have contributed to management and visualization. The teacher can make timely decisions in the training process and provide feedback on the learning environments' activities. Since the appearance of virtual tools, the implementation of Artificial Intelligence has become a basic need for virtual education, enhancing understanding and understanding the specific needs of the student.

Keywords: collaborative learning, flipped classroom, learning strategies, artificial intelligence, computer programming.

Tabla de Contenidos

	Página
Introducción	198
Metodología	199
Preguntas de investigación	199
Fuentes de información y cadenas de búsqueda	199
Análisis de información de referencias	199
Resultados	200
Estado actual del aula invertida y el aprendizaje colaborativo	200
Estado actual del aula invertida	201
Estado actual del aprendizaje colaborativo	204
La inteligencia artificial para el aprendizaje de los cursos de programación	205
Conclusiones	208
Referencias	209

Introducción

Las estrategias pedagógicas cumplen un papel importante en los procesos de enseñanza y aprendizaje, pues ayudan a mejorar la motivación, participación, colaboración e interacción entre estudiantes y profesores (Burch y Melby, 2019, Chinchilla y Gómez, 2020). La implementación de estrategias de aprendizaje puede ser útil en la gestión académica del estudiante, mejorar su rendimiento y aportar en la generación de nuevo conocimiento significativo basado en el autoaprendizaje (Montero y Benavides, 2015). Actualmente dichas estrategias buscan soluciones que ayudan a mejorar las destrezas de los estudiantes para la solución de problemas (Bravo *et al.*, 2013). En este sentido, estrategias como el aula invertida (AI) y el aprendizaje colaborativo (AC) surgen para mejorar hábitos de aprendizaje, pensamiento crítico y la colaboración en el intercambio de conocimiento de los estudiantes (Amresh *et al.*, 2013). El AI se ha enfocado en el aprendizaje mixto, donde el estudiante alcanza sus propias bases a través del autoaprendizaje y en clase resuelve dudas con apoyo del profesor. Por su parte el AC, se enfoca en la construcción de habilidades que le permiten al estudiante tener bases que no se encuentran en la enseñanza tradicional de un curso (Fortanet van Assendelft, 2013).

Implementar estas estrategias pedagógicas puede ser un proceso difícil, sin la ayuda de herramientas y tecnologías que controlen el proceso formativo y evaluativo del estudiante. En este sentido, la implementación de tecnologías y técnicas computacionales de inteligencia artificial han mejorado el intercambio de un espacio real a uno virtual de forma natural, logrando adaptarse a las necesidades específicas de cada estudiante (Mok, 2014, Salazar Ospina *et al.*, 2017). Entre las diferentes aplicaciones de la inteligencia artificial como apoyo al aprendizaje de programación, aparecen sistemas de recomendación, plataformas virtuales de aprendizaje, soporte de colaboración a través de formación de grupos, identificación de perfiles, chat de soporte automático, evaluación y realimentación de código fuente, toma de decisiones a través de visualizaciones, entre otros (Billis y Cubenas, 2020).

El propósito de este artículo es identificar el estado actual del AI y el AC, las tecnologías, estrategias y herramientas existentes, y el papel de la inteligencia artificial como apoyo para el aprendizaje de los cursos de programación. Así, el documento se ha organizado de la siguiente forma. En la metodología se detallan las preguntas investigativas, las fuentes de información, cadenas de búsqueda, filtros para los datos, análisis y presentación de la información. En “Análisis de información” se describe el proceso utilizado para la identificación y el procesamiento de las referencias. En “Resultados” se presenta el estado actual del AI y AC, y los aportes de la inteligencia artificial a los cursos de programación, por último, se mencionan las tendencias y los logros que se proponen alcanzar los autores.

Metodología

Siguiendo las fases para realizar una revisión sistemática propuesta en (Kitchenham *et al.*, 2010), se especifican las preguntas de investigación, selección de fuentes de información y se desarrolla un protocolo de revisión y análisis.

Preguntas de investigación

Se plantearon preguntas de interés que identifican el estado actual a partir de dos estrategias pedagógicas utilizadas para apoyar el aprendizaje de la programación: ¿Cuál es el estado actual de las tecnologías, estrategias y herramientas basadas en aprendizaje activo y el aprendizaje colaborativo como apoyo al aprendizaje de la programación?; ¿cómo el aula invertida y el aprendizaje colaborativo a través de técnicas computacionales de inteligencia artificial apoyan los cursos de programación?; ¿cuál es el papel de la inteligencia artificial en el aprendizaje de los cursos de programación?

Fuentes de información y cadenas de búsqueda

En la tabla 1, se muestran cinco funciones de búsquedas específicas y los registros por cada consulta para las fuentes de datos: Scopus, Web of Science (WoS), ACM Digital Library, IEEE Xplore, ScienceDirect y GitHub. Las funciones de búsqueda se construyeron con palabras claves afines al tema de investigación con ayuda de profesores e investigadores expertos en el tema.

Luego de obtener los registros, se usó la metodología PRISMA (Moher *et al.*, 2010), para filtrar la información con base en cuatro criterios: información incompleta, nombre repetido de publicación, calidad de la conferencia o revista, no DOI, bajo número de citas, estrellas, copias y tenedores. Finalmente se obtuvieron 210 registros: 166 documentos y 44 repositorios.

Análisis de información de referencias

Para responder a las preguntas planteadas, se procesan las referencias utilizando diferentes implementaciones. Se construye un flujo de trabajo basado en tres procesos (figura 1): i) Las referencias; por un lado, con ayuda de NER-Spacy (Vychegzhanin y Kotelnikov, 2019), se extraen las características de los repositorios: citas, año, autor, copias, tenedores, estrellas y actualizaciones; por otro, se extraen las características de los documentos científicos: año, palabras clave, resumen, DOI, autores y organizaciones. ii) Las características extraídas son procesadas con NER-Spacy, para obtener entidades específicas, por ejemplo: técnicas, estrategias, métodos, tipo de tecnología, tipo de software y lenguajes de programación. iii) Se construyeron dos visualizaciones: la primera se construye a partir de la librería D3 (Bostock, s. f.) para visualizar la evolución tecnológica de los proyectos más relevantes, estrategias de aprendizaje, tipos de tecnologías y los lenguajes de programación utilizados en los últimos siete años. La segunda se construye con la herramienta SASR (Guerrero, 2019), para clasificar

a través de una ontología de datos que contiene las líneas y sublíneas de las ciencias de computación, tomadas del Sistema de Clasificación por Computadora (CCS) (Association for Computing Machinery [ACM], s. f.).

Resultados

En esta sección se presentan los hallazgos a partir del año 2013; el análisis muestra el estado actual de las tecnologías, estrategias y herramientas basadas en AI y el AC. También el papel actual y las tendencias de la inteligencia artificial como apoyo en el aprendizaje de los cursos de programación.

Estado actual del aula invertida y el aprendizaje colaborativo

Para identificar el estado actual de las tecnologías, estrategias y herramientas se realizó la categorización de la información de las referencias, según el año de publicación. En esta sección se responde a la pregunta ¿cuál es el estado actual de las tecnologías, estrategias y herramientas basadas en aprendizaje activo y el aprendizaje colaborativo como apoyo al aprendizaje de la programación?

Tabla 1. Funciones de búsqueda, fuentes de datos y registros totales por consulta

	Consulta	Fuente de datos	Registros
1	((("flipped classroom") AND ("programming course")) AND ("artificial intelligence"))	Scopus, WoS, ACM Digital Library, IEEE Xplore y ScienceDirect	98
2	((("collaborative learning") AND ("programming course")) AND ("artificial intelligence"))	Scopus, WoS, ACM Digital Library, IEEE Xplore y ScienceDirect	61
3	((programming courses)+(collaborative learning)+(artificial intelligence) (programming courses)+(flipped classroom)+(artificial intelligence) SentenceYear=FROM*2013)	GitHub	73

Fuente: elaboración propia.

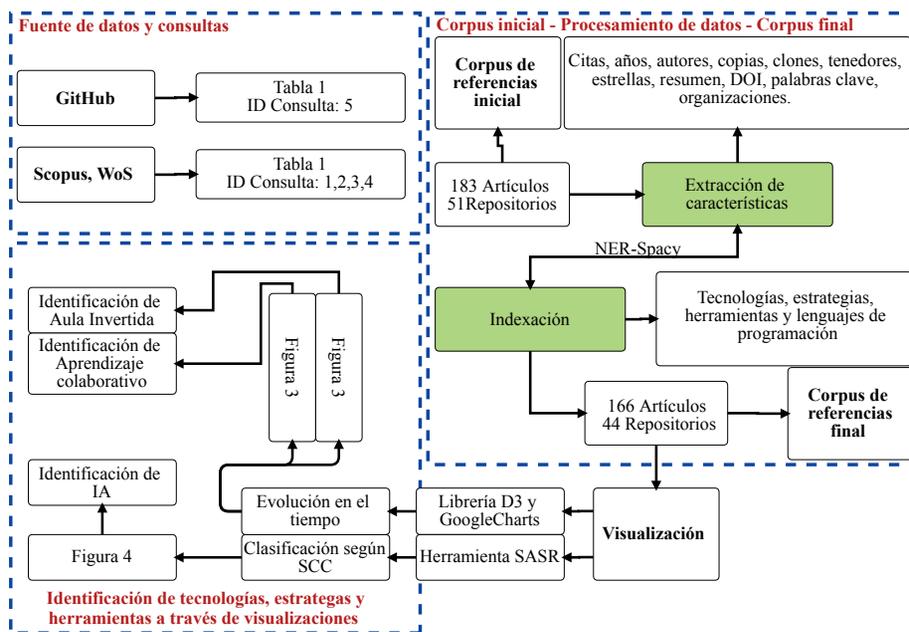


Figura 1. Flujo de trabajo de la identificación, análisis y procesamiento de las referencias

Fuente: elaboración propia.

Estado actual del aula invertida

En las figuras 2 y 3, se observan el avance del aula invertida donde encontramos diferentes implementaciones y estrategias que han servido de apoyo en el aprendizaje de la programación.

Entre los años 2013 y 2016 se utilizaron varias estrategias que aportaron al aula invertida como apoyo al aprendizaje de la programación, el primer aporte se basó en la interacción individual, donde el estudiante adquiere unos conocimientos y desarrolla ejercicios relacionados a código fuente de forma individual, aquí el profesor se enfocó en el análisis y comprensión de los contenidos y la motivación del estudiante por el aprendizaje. Luego se implementó el aprendizaje semipresencial que combina la presencialidad (desarrollo de actividades en el aula) con el trabajo en línea (uso de internet y herramientas digitales) para cambiar los procesos de enseñanza/aprendizaje, pasando del trabajo individual al colaborativo, apoyando el desarrollo de programas en parejas y pequeños grupos. Después se incorporaron videos realizados por los profesores al proceso de enseñanza, los estudiantes generaban su visualización en jornadas extraclase y usaban la clase presencial para el desarrollo de ejercicios y proyectos de programación, con la retroalimentación del profesor y el apoyo de los compañeros (Bachelor y Bachelor, 2019 , Nunn et al., 2016).

	2013	2014	2015	2016
Estrategias	Interacciones individuales aprendizaje semipresencial	Videos extra clases orientada a la experimentación	Videos dinámicos	Autocomprobación, Evaluación automática, Tutoría en línea, Ejercicios con retroalimentación
Tecnologías	CMS, LMS, LCMS Procesadores de texto Cloud	Cursos virtuales, MOOC, AVA, OVA	LEGO, REA, OER, Podcast Blended learning	Moocs + Evaluadores automaticos de código fuente
Herramienta	X2 MOODLE Google Drive One Drive PowerPoint	opoos FlipClass OpenEdX Coursera Youtube	Flippd Django- ClasseInversee BEN-TI Mindstorms	flipped-demos Flipped course Flipped Classroom Programming Prezzi

Figura 2. Evolución de tecnologías, estrategias y herramientas basadas en aula invertida (2013-2016)

Fuente: elaboración propia.

Durante estos años se encuentran proyectos relevantes para el apoyo del aprendizaje, tecnologías como sistemas de gestión de contenidos (CMS, por su sigla en inglés), entorno virtual de aprendizaje (EVA) y objetos virtuales de aprendizaje (OVA), han evolucionado desde su implementación con escasos elementos de configuración y poco material disponible, hasta sistemas que integran metodologías para fortalecer el desarrollo del aprendizaje de manera intuitiva, la educación basada en proyectos y las comunidades de aprendizaje autónomo (Barik *et al.*, 2013, Grover *et al.*, 2014). En el desarrollo de herramientas y estrategias se encuentran trabajos basados en aula invertida para la enseñanza de lenguajes de programación como Python, Ruby, Objective-C, JavaScript, R y Swift en cursos gratuitos (Ahmed *et al.*, 2016, Hayashi *et al.*, 2015, Pe Rosiene y Rosiene, 2015), que implementan estrategias como cuestionarios informados, evaluadores de código fuente, juego de roles, entre otras, que se apoyan en videos interactivos, debates virtuales, plataformas con compiladores en línea y tecnologías como recursos educativos abiertos (OER, por su sigla en inglés) (Johnson *et al.*, 2016).

En 2017 y 2018 se implementaron varias estrategias a los procesos de enseñanza, por ejemplo, la evaluación automática, que utiliza una metodología de evaluación en línea y que permite detectar de las preguntas a evaluar cuáles se contestan correctamente y cuáles no, tras realizar el estudio previo del material correspondiente a programación. También se implementó la tutoría en línea, donde el

	2017	2018	2019	2020
Estrategias	Cuestionarios autoinformados Auto evaluación	Gamificación, Aprendizaje Basado en Investigación, Preguntas de autograbadas con secuenciación	ABP , Debates online, Juego de Roles, Videos, Aprendizaje Personalizada	Inverso del profesor Clase doble (aula 4.0) Aprendizaje asistido por computador
Tecnologías	MOOC, SPOC, Blackboard, E-learning Taxonomía de Bloom	LMS, Flipped Learning Network	MOOCs automáticos Realidad Aumentada en juegos de aprendizaje	Calificación automática Software adaptativo Tutores online Realimentación online Información embebida
Herramienta	Fifcos Flipped Classroom Trampoline ludere-old	nodeqb comp495 sp18 flipped tech SOPHIA Facebook	Flipped Classroom PyCrawler ML100Days Psychocognitive-in-flipped-classroom	Kahoot Socrative Cavan

Figura 3. Evolución de tecnologías, estrategias y herramientas basadas en aula invertida (2017-2020)

Fuente: elaboración propia.

estudiante solicita al profesor una orientación a través del sistema de gestión de aprendizaje y el docente la realiza sin necesidad de tener presencialidad con el estudiante, estas tutorías se pueden grabar y sirven de soporte para el aprendizaje de otros estudiantes.

Así mismo se implementaron ejercicios con retroalimentación que apoyaron los procesos de aprendizaje de los cursos de programación a través de la identificación de errores comunes de los estudiantes durante la generación de código fuente. De la misma forma se utilizó la gamificación que ayudó a mejorar la motivación de los aprendices frente al desarrollo de las actividades propuestas en los cursos (Criollo-C y Luján-Mora, 2018, Llorente *et al.*, 2020).

Todas estas estrategias se soportan con tecnologías como los MOOC (*massive open online course*), se caracterizaron por dar respuesta y evaluar contenidos en tiempo real, múltiples configuraciones para la formación de grupos y diferentes formas de evaluación en los cursos; todos estos elementos han contribuido a mejorar los procesos educativos y formativos. También se han integrado sistemas virtuales de tutoría en línea con retroalimentación, ejercicios de autoevaluación y tareas calificadas automáticamente (Clark *et al.*, 2016, Seeling, 2016), todo esto soportado con herramientas de evaluación automática de código y uso de herramientas como Blackboard (Blackboard.es, s. f.), Udere, Kattis, Baekjoon y Judge Node (Juan, n. d.).

Desde 2019 se han implementado diferentes estrategias como el aprendizaje basado en problemas, debates en línea, juego de roles, aprendizaje personalizado, clase doble, entre otros, que han aportado a la enseñanza de la programación. Por ejemplo, la comunicación entre el docente y el estudiante mejoró, y en algunos casos es personalizada, esto permite aclarar dudas o necesidades específicas para cada alumno. Los estudiantes avanzan según su ritmo de aprendizaje y el docente puede generar retroalimentación sobre temas específicos del curso. También se mejoró la motivación de los estudiantes, porque están buscando constantemente soluciones a los problemas propuestos por el profesor. Además, las clases se pueden desarrollar sin la presencia de los docentes porque existen plataformas y materiales digitales que se pueden acceder y estudiar según la disposición de los estudiantes. La visión del aula invertida está enfocada en proyectos de plataformas de aprendizaje como Google Classroom, Coursera, Facebook, Learn, Platzi, donde se mejoran los procesos de aprendizaje con la implementación de asistentes virtuales que adaptan las clases a las necesidades del estudiante. Proyectos como (Lopukhova *et al.*, 2020, Tong *et al.*, 2020) muestran implementaciones y comparaciones de diferentes asistentes virtuales y nuevas formas de educación virtual que ayudan al estudiante tener una clase virtual dinámica, activa y con muy pocos recursos de software.

Estado actual del aprendizaje colaborativo

Las figuras 4 y 5 muestran los avances del aprendizaje colaborativo, donde se encuentran diferentes implementaciones y estrategias que han servido de apoyo en el aprendizaje de la programación.

Entre 2013 y 2016, diferentes estrategias se implementaron y evolucionaron, por ejemplo: los debates, los cuales fueron claves para la programación grupal y la programación en parejas; estas ayudaron a generar estrategias colaborativas para apoyar el aprendizaje de la programación integrando diferentes herramientas y tecnologías (Hayashi *et al.*, 2015), mejorando los procesos académicos, despertando habilidades y destrezas que le permiten al estudiante ser un profesional idóneo en la industria. Entre estos años, además surgen modelos de colaboración y cooperación que fomentan la inteligencia colectiva (Suárez Valencia *et al.*, 2015), asimismo la implementación de técnicas computacionales para guiar grupos y herramientas de codificación y discusión colaborativa (Sun *et al.*, 2019).

Entre 2017 y 2018 se encuentran diferentes herramientas basadas en la evaluación colaborativa a través de jueces virtuales (Hidalgo Suárez *et al.*, 2018) que permiten evaluar código fuente de manera sintáctica y semántica en proyectos colaborativos, ofreciendo realimentación grupal. En estos años toma fuerza la programación grupal apoyada en herramientas virtuales que realizan el seguimiento del proceso de un grupo de estudiantes (Amarasinghe *et al.*, 2017, Hwei Wang y Liao, 2017). La gestión de proyectos de programación con diferentes formas de pensar lleva a que se construyan metodologías que faciliten la configuración de equipos dependiendo de las habilidades de cada estudiante; en este sentido aparece el colaborativo apoyado por computador (CSCL), que busca integrar profesor, tecnología y estudiantes para obtener lo mejor de cada uno y generar estrategias para la toma de decisiones en el proceso de aprendizaje (Mader y Bry, 2019, Sánchez-Azqueta *et al.*, 2019, Viberg *et*

	2013	2014	2015	2016
Estrategias	Debates Ejercicios de programación grupal	Programación en Parejas	Trabajo Social colaborativo Discusión entre pares Programación por colaboración	Evaluación automática Retroalimentación grupal
Tecnologías	CMS, LMS, LCMS Cloud	MOOC	REA OER	Eduotecas E-learning
Herramienta	Google Drive	OpenEdX Coursera Youtube	Flippd ClasseInversee BEN-T1 Mindstorms Scratch	flipped-daemonS MyLab programming

Figura 4. Evolución de tecnologías, estrategias y herramientas basadas en aprendizaje colaborativo (2013-2016)

Fuente: elaboración propia.

al., 2020); cursos de programación basados en las habilidades cognitivas y emocionales (*Avry et al.*, 2020, *Awidi y Paynter*, 2019); hasta plataformas que unen la gestión y diseño de cursos de programación basados en la colaboración (*Suárez Valencia et al.*, 2015), donde se puede evaluar y realimentar conocimientos grupales e individuales y generar estrategias para la toma de decisiones. Este tipo de plataformas promueven el aprendizaje de la programación a partir de jueces virtuales con capacidad de evaluar el código sintáctico y semántico (*Sun et al.*, 2019), utilizan algoritmos para identificación de perfiles, gestión de grupos y evaluación de conocimientos a través de rúbricas.

A partir de 2019, se han implementado redes de conocimiento, redes sociales de los estudiantes y aplicaciones virtuales didácticas basadas en aprendizaje colaborativo apoyado por computador (CSCL), con el propósito de mejorar el aprendizaje colaborativo de los estudiantes (*Xie et al.*, 2020), usando las redes sociales de los estudiantes, aplicaciones virtuales didácticas basadas en aprendizaje colaborativo apoyado por computador (CSCL).

La inteligencia artificial para el aprendizaje de los cursos de programación

La tecnología y la educación actualmente se encuentran en su punto de exploración, donde la integración del aula invertida y la colaboración cumplen un papel importante en el proceso de formación

	2017	2018	2019	2020
Estrategias	Videos dinámicos de interacción grupal Programación en Parejas	Aprendizaje colaborativo asistido por computador	Aprendizaje colaborativo basado en reglas y jueces virtuales Rubricas de evaluación grupal	Clase basada en autogestión de grupos Clase doble (aula 4.0) Aprendizaje asistido por computador
Tecnologías	Taxonomía de Bloom	LMSG Flipped Learning Social network	Realidad virtual colaborativa	Software adaptativo Tutores online Realimentación online
Herramienta	Fifcos Flipped Classroom VariantSpark	Flipped Classroom nodeqb SOPHIA Facebook	Algorithm Flipped Classroom PyCrawler flip_table	Kahoot Socratic Cavan M-IDEA UNCode

Figura 5. Evolución de tecnologías, estrategias y herramientas basadas en aprendizaje colaborativo (2017-2020)

Fuente: elaboración propia.

del estudiante, buscando mecanismos de interacción lo más cercanos al aula de clases tradicional. Las técnicas de inteligencia artificial han ayudado a mejorar los procesos adecuándose a las necesidades de los estudiantes, logrando que la educación tradicional se pueda apoyar en la educación virtual, generando asistentes inteligentes, evaluadores de código automáticos, identificación de perfiles, sistemas de recomendación, etc. En esta sección se abordan las preguntas ¿cómo el aula invertida y el aprendizaje colaborativo a través de técnicas computacionales de inteligencia artificial apoyan los cursos de programación?, y ¿cuál es el papel que tendrá la inteligencia artificial en el aprendizaje de los cursos de programación?

En la figura 6 se muestran las referencias según las técnicas computacionales a partir del Sistema de Clasificación de Computación de ACM. Se detallan los artículos y proyectos (puntos negros: artículos, puntos blancos: repositorios), esta clasificación indica la tendencia del uso de las técnicas de inteligencia artificial.

Actualmente, la implementación de inteligencia artificial en las estrategias pedagógicas ha mostrado avances significativos en el aprendizaje de la programación, utilizando procesamiento del lenguaje natural, aulas cibernéticas que registran las conferencias de forma automática y se almacenan en línea. Estas herramientas permiten crear mesas de trabajo donde el docente interactúa con

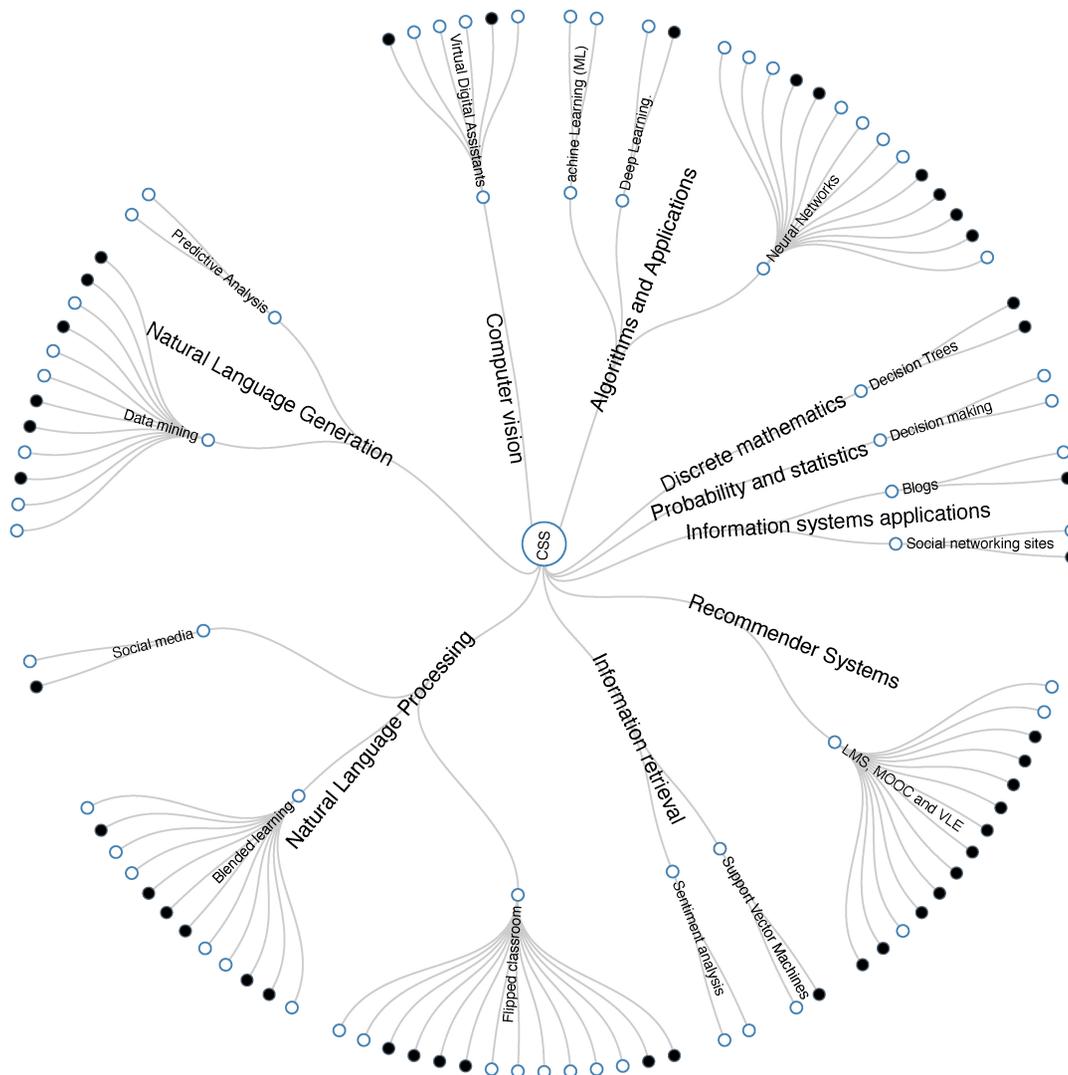


Figura 6. Clasificación de las referencias según las categorías de la CSS-ACM

Fuente: elaboración propia.

sus estudiantes y desarrolla el aprendizaje activo y colaborativo (Burch y Melby, 2019). Basados en aprendizaje automático, por un lado, se encuentran implementaciones de algoritmos de evaluación integral difuso para el análisis de códigos fuente, a partir de los árboles sintácticos (Lei et al., 2017). Por otro lado, proyectos que implementan técnicas de análisis de datos con agrupamiento jerárquico aglomerado para analizar la secuencia de aprendizaje exploratorio del estudiante, identificando comportamientos relacionados con el aprendizaje y agrupando secuencias de aprendizaje similar (Trivodaliev et al., 2017). Proyectos basados en minería de datos educativos, que combinan métodos de

seguimiento grupal, ayudan a identificar y seguir el proceso de los estudiantes, con el fin de observar las limitaciones y desafíos frente el aprendizaje (Sheard *et al.*, 2013). Estrategias de aprendizaje para reforzar los comportamientos del aprendizaje y las características de los estudiantes en clase de programación (Abirami y Kiruthiga, 2018). Por último, según la clasificación, donde hay mayor aporte de la inteligencia artificial es en la implementación de técnicas de asociación, clasificación y agrupación de estudiantes con asistentes virtuales autónomos (Billis y Cubenas, 2020).

La visión de la inteligencia artificial está basada en la implementación de *framework* educacionales (Fernández-Cerero y Fernández-Montes, 2020) que integran componentes virtuales como tableros digitales, asistentes virtuales, jueces automáticos de código desde diferentes plataformas. La tendencia está en la implementación de arquitecturas basadas en la nube (educación en la nube) que son nuevas implementaciones que apoyan académicos y estudiantes a través de gamificación, colaboración abierta y distribuida, entre otras técnicas que mejoran el aprendizaje (Zhang *et al.*, 2020): clases adaptativas que involucran la parte cognitiva, abstracta y lógica con técnicas de deep learning en el aprendizaje virtual (Gren, 2020, Ramaprasad *et al.*, 2020); plataformas que ayudan a mejorar la experiencia de aprendizaje en los estudiantes, donde su conocimiento se va generando según sus preferencias de estudio y experiencias de aprendizaje (Algayres y Triantafyllou, 2020, Ciolacu *et al.*, 2019).

Conclusiones

Este trabajo presenta el estado actual del AI y el AC como apoyo para el aprendizaje de la programación de computadores; las tecnologías, estrategias y herramientas existentes, y el papel que tendrá la inteligencia artificial para el aprendizaje de los cursos de programación. Se encontró que los elementos identificados ayudaron a mejorar los procesos formativos de los estudiantes, con evaluación automática de código, ejercicios con retroalimentación, tutoriales interactivos, programación en parejas y ejercicios de programación grupal, que se basaron en la integración de algoritmos de inteligencia artificial.

Luego de realizar la investigación, se puede concluir que, desde la aparición de las herramientas virtuales, la implementación de inteligencia artificial se ha convertido en una necesidad para la educación virtual, porque potencia la forma de entender y aprender, adaptándose a las necesidades específicas del estudiante. A futuro, la inteligencia artificial tendrá un papel muy importante en la implementación de algoritmos para la identificación de aprendizaje personalizado a partir del aprendizaje automático, procesamiento de lenguaje natural, aprendizaje profundo, analíticas de aprendizaje y minería de datos; que se integran a plataformas virtuales capaces de extraer información de redes sociales con valor agregado para generar estrategias de evaluación y realimentación en los procesos formativos de los estudiantes. Sin embargo, aún quedan preguntas abiertas de exploración, para determinar mejoras en los niveles de aprendizaje tradicional y la implementación de estrate-

gias virtuales. En trabajos previos relacionados al AI y el AC se identificaron aportes significativos relacionados con el aprendizaje de la programación, que han abordado la evaluación automática de código fuente, la identificación de estudiantes en riesgo y el trabajo colaborativo. Sin embargo, como trabajo futuro se propone trabajar en la retroalimentación de los ejercicios de programación, con el fin dar respuesta a los inconvenientes y malas prácticas que se pueden presentar durante la escritura del código fuente. De esta forma se puede apoyar el proceso de aprendizaje, mejorando el interés y la motivación del aprendiz por el desarrollo del software.

De las herramientas basadas en aula invertida y la colaboración encontrada en este artículo, las que más se destacan como apoyo al aprendizaje del curso de programación, son: EdX, Coursera, Caccoo, Socrative, y las que usan inteligencia artificial son: M-IDEA, UNCode, MyLAB programming.

Referencias

- [Abirami y Kiruthiga, 2018] Abirami, A. M. y Kiruthiga, P. (2018). Collaborative learning tools for data structures. *Journal of Engineering Education Transformations*, 31(3), 79-83. ↑Ver página 208
- [Ahmed *et al.*, 2016] Ahmed, B., Aljaani, A. y Yousuf, M. I. (2016). Flipping introductory engineering design courses: Evaluating their effectiveness. En *IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON*, (pp. 234-239). <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2016.7474559> ↑Ver página 202
- [Algayres y Triantafyllou, 2020] Algayres, M. y Triantafyllou, E. (2020). Combining the flipped classroom and simulation games in engineering education: A methodological survey. En *SEFI 47th Annual Conference: Varietas Delectat... Complexity Is the New Normality, Proceedings* (pp. 83-92). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85077815856&partnerID=40&md5=f5e6903495c4235b6a899968f2801dab> ↑Ver página 208
- [Amarasinghe *et al.*, 2017] Amarasinghe, I., Hernández-Leo, D. y Jonsson, A. (2017). Intelligent Group Formation in Computer Supported Collaborative Learning Scripts. En *Proceedings - IEEE 17th International Conference on Advanced Learning Technologies, ICALT 2017* (pp. 201-203). <https://doi.org/10.1109/ICALT.2017.62> ↑Ver página 204
- [Amresh *et al.*, 2013] Amresh, A., Carberry, A. R. y Femiani, J. (2013). Evaluating the effectiveness of flipped classrooms for teaching CS1. En *2013 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)* (pp. 733-735). <https://doi.org/10.1109/FIE.2013.6684923> ↑Ver página 198
- [ACM, 2012] Association for Computing Machinery (ACM). (s. f.). *The 2012 ACM Computing Classification System*. <https://www.acm.org/publications/class-2012> ↑Ver página

- [Avry *et al.*, 2020] Avry, S., Chanel, G., Bétrancourt, M. y Molinari, G. (2020). Achievement appraisals, emotions and socio-cognitive processes: How they interplay in collaborative problem-solving? *Computers in Human Behavior*, 107. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106267> ↑Ver página 205
- [Awidi y Paynter, 2019] Awidi, I. T. y Paynter, M. (2019). The impact of a flipped classroom approach on student learning experience. *Computers and Education*, 128, 269-283. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.09.013> ↑Ver página 205
- [Bachelor y Bachelor, 2019] Bachelor, J. W. y Bachelor, J. W. (2019). El aula presencial, semipresencial, virtual e invertida: un estudio comparativo de métodos didácticos en la enseñanza de L2. *Revista Educación*, 43(2), 527-539. <https://doi.org/10.15517/revedu.v43i2.34014> ↑Ver página 201
- [Barik *et al.*, 2013] Barik, T., Everett, M., Cardona-Rivera, R. E., Roberts, D. L. y Gehringer, E. F. (2013). A community college blended learning classroom experience through Artificial Intelligence in Games. En *Proceedings - Frontiers in Education Conference, FIE* (pp. 1525-1531). <https://doi.org/10.1109/FIE.2013.6685093> ↑Ver página 202
- [Billis y Cubenas, 2020] Billis, S. y Cubenas, O. (2020). Assessing collaborative learning with e-tools in engineering and computer science programs. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1070, 848-854. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32523-7_62 ↑Ver página 198, 208
- [blackboard] blackboard.es. (s. f.). ¿Qué es Blackboard Learn? Ayuda de Blackboard. https://help.blackboard.com/es-es/Learn/Instructor/Getting_Started/What_Is_Blackboard_Learn ↑Ver página
- [Bostock, s. f.] Bostock, M. (s. f.). *D3.js-Data-Driven Documents*. <https://d3js.org/> ↑Ver página
- [Bravo *et al.*, 2013] Bravo, L. E. C., Elizalde, I. E. y Ortiz, J. A. T. (2013). Estrategias educativas para el uso de las TIC en educación superior. *Tecnura*, 17, 161-173. ↑Ver página 198
- [Burch y Melby, 2019] Burch, M. y Melby, E. (2019). Teaching and evaluating collaborative group work in large visualization courses. En *ACM International Conference Proceeding Series* (pp. 1-8). <https://doi.org/10.1145/3356422.3356447> ↑Ver página 198, 207
- [Chinchilla y Gómez, 2020] Chinchilla, C. M. D. y Gómez, A. A. R. (2020). Aprendizaje activo e innovación en estudiantes de ingeniería. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 1(35), 127-135. ↑Ver página 198
- [Ciolacu *et al.*, 2019] Ciolacu, M., Tehrani, A. F., Binder, L. y Svasta, P. M. (2019). Education 4.0- Artificial Intelligence Assisted Higher Education: Early recognition System with Machine Learning to support Students' Success. En *2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Techno-*

- logy in Electronic Packaging, SIITME 2018 - Proceedings* (pp. 23-30). <https://doi.org/10.1109/SIITME.2018.8599203> ↑Ver página 208
- [Clark *et al.*, 2016] Clark, R. M., Kaw, A. y Besterfield-Sacre, M. (2016). Comparing the effectiveness of blended, semi-flipped, and flipped formats in an engineering numerical methods course. *Advances in Engineering Education*, 5(3). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85006761527&partnerID=40&md5=3b34e0497418055bc0df77b1a3d4a2b6> ↑Ver página 203
- [Criollo-C y Luján-Mora, 2018] Criollo-C, S. y Luján-Mora, S. (2018). Encouraging student motivation through gamification in engineering education. En *Interactive Mobile Communication, Technologies and Learning* (pp. 204-211). https://doi.org/10.1007/978-3-030-11434-3_24 ↑Ver página 203
- [Fernández-Cerero y Fernández-Montes, 2020] Fernández-Cerero, D. y Fernández-Montes, A. (2020). Project-based methodology to lecture on web frameworks applied to the management of health-related data. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 951, 321-328. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20005-3_33 ↑Ver página 208
- [Fortanet van Assendelft, 2013] Fortanet van Assendelft, C. A. (2013). *Aprendizaje cooperativo y flipped classroom. Ensayos y resultados de la metodología docente*. Universidad de Alicante; Vicerrectorado de Estudios, Formación y Calidad. ↑Ver página 198
- [Gren, 2020] Gren, L. (2020). A flipped classroom approach to teaching empirical software engineering. *IEEE Transactions on Education*, 63(3), 155-163. <https://doi.org/10.1109/TE.2019.2960264> ↑Ver página 208
- [Grover *et al.*, 2014] Grover, S., Pea, R. y Cooper, S. (2014). Promoting active learning & leveraging dashboards for curriculum assessment in an OpenEdX introductory CS course for middle school. En *Proceedings of the First ACM Conference on Learning@ Scale Conference* (pp. 205-206). <https://doi.org/10.1145/2556325.2567883> ↑Ver página 202
- [Guerrero, 2019] Guerrero, V. A. B. (2019). Desarrollo del estado del arte en investigación: una herramienta basada en inteligencia artificial. *Revista Politécnica*, 15(30), 70-81. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v15n30a7> ↑Ver página 199
- [Hayashi *et al.*, 2015] Hayashi, Y., Fukamachi, K.-I. y Komatsugawa, H. (2015). Collaborative learning in computer programming courses that adopted the flipped classroom. En *Proceedings - 2015 International Conference on Learning and Teaching in Computing and Engineering, LaTiCE 2015* (pp. 209-212). <https://doi.org/10.1109/LaTiCE.2015.43> ↑Ver página 202, 204

- [Hidalgo Suárez *et al.*, 2018] Hidalgo Suárez, C. G., Bucheli, V. A., Restrepo-Calle, F. y González, F. A. (2018). A strategy based on technological maps for the identification of the state-of-the-art techniques in software development projects: Virtual judge projects as a case study. En J. E. Serrano y J. C. Martínez-Santos (Eds.), *Advances in computing* (pp. 338- 354). Springer International Publishing https://doi.org/10.1007/978-3-319-98998-3_27 ↑Ver página 204
- [huei Wang y Liao, 2017] huei Wang, Y. y Liao, H. C. (2017). Learning performance enhancement using computer- assisted language learning by collaborative learning groups. *Symmetry*, 9(8), 141. <https://doi.org/10.3390/sym9080141> ↑Ver página 204
- [Johnson *et al.*, 2016] Johnson, C., McGill, M., Bouchard, D., Bradshaw, M. K., Bucheli, V. A., Merkle, L. D., Scott, M. J., Sweedyk, Z., Velázquez-Iturbide, J. Á., Xiao, Z. y Zhang, M. (2016). Game Development for Computer Science Education. En *Proceedings of the 2016 ITiCSE Working Group Reports* (pp. 23-44). <https://doi.org/10.1145/3024906.3024908> ↑Ver página 202
- [Juan, n.d.] Juan, M. (s. f.). *udere-old: EVA orientado al b-learning con gamification para facilitar la modalidad flipped-classroom*. <https://github.com/juanmamaffei/ludere-old> ↑Ver página
- [Kitchenham *et al.*, 2010] Kitchenham, B., Pretorius, R., Budgen, D., Brereton, O. P., Turner, M., Niazi, M. y Linkman, S. (2010). Systematic literature reviews in software engineering-a tertiary study. *Information and Software Technology*, 52(8), 792-805. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2010.03.006> ↑Ver página 199
- [Lei *et al.*, 2017] Lei, C.-U., Yau, C.-W., Lui, K.-S., Yum, P., Tam, V., Yuen, A. H.-K. y Lam, E. Y. (2017). Teaching Internet of Things: Enhancing learning efficiency via full-semester flipped classroom. En *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Teaching, Assessment and Learning for Engineering, TALE 2017* (pp. 56-60). <https://doi.org/10.1109/TALE.2017.8252304> ↑Ver página 207
- [Llorente *et al.*, 2020] Llorente, L. D., Gómez, E. A. V. y Villamizar, S. C. (2020). Gamificación como estrategia pedagógica medida por TIC en educación básica primaria. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 2(34), 111-116. ↑Ver página 203
- [Lopukhova *et al.*, 2020] Lopukhova, J., Makeeva, E. y Rudneva, T. (2020). Using flipped classroom in foreign language teaching: Implementation of interactive educational technologies. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1135, 619-630. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40271-6_61 ↑Ver página 204
- [Mader y Bry, 2019] Mader, S. y Bry, F. (2019). Phased classroom instruction: A case study on teaching programming languages. En *CSEDU 2019 - Proceedings of the 11th International Conference on Computer Supported Education*, 1, 241-251. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85067114371&partnerID=40&md5=1ddf4f4d561f5919e5a8944c9d03f1bf> ↑Ver página 204

- [Moher *et al.*, 2010] Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J. y Altman, D. G. (2010). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *International Journal of Surgery*, 8(5), 336-341. <https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2010.02.007> <https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2010.02.007> ↑Ver página 199
- [Mok, 2014] Mok, H. N. (2014). Teaching tip: The flipped classroom. *Journal of Information Systems Education*, 25(1), 7-11. ↑Ver página 198
- [Montero y Benavides, 2015] Montero, E. L. P. y Benavides, E. S. (2015). Estructuras de decisión a partir del aprendizaje autorregulado en ambientes B-Learning. *Tecnura*, 19, 15-24. ↑Ver página 198
- [Nunn *et al.*, 2016] Nunn, S., Avella, J. T., Kanai, T. y Kebritchi, M. (2016). Learning analytics methods, benefits, and challenges in higher education: A systematic literature review. *Online Learning*, 20(2). <https://doi.org/10.24059/olj.v20i2.790> ↑Ver página 201
- [Pe Rosiene y Rosiene, 2015] Pe Rosiene, C. y Rosiene, J. A. (2015). Flipping a programming course: The good, the bad, and the ugly. En *Proceedings - Frontiers in Education Conference, FIE, 2014* (pp. 1-3). <https://doi.org/10.1109/FIE.2015.7344151> ↑Ver página 202
- [Ramaprasad *et al.*, 2020] Ramaprasad, H., Bahamon, J. C., Jones, R. H. y Watson, S. (2020). Using forcing functions to improve student preparedness in an operating systems and networking class. En *Annual Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education, ITiCSE*, (p. 1366). <https://doi.org/10.1145/3328778.3372668> ↑Ver página 208
- [Salazar Ospina *et al.*, 2017] Salazar Ospina, O. M., Rodríguez Marín, P. A., Ovalle Carranza, D. A. y Duque Méndez, N. D. (2017). Interfaces adaptativas personalizadas para brindar recomendaciones en repositorios de objetos de aprendizaje. *Tecnura*, 21(53), 107-118. <https://doi.org/10.14483/22487638.9287> ↑Ver página 198
- [Sánchez-Azqueta *et al.*, 2019] Sánchez-Azqueta, C., Celma, S., Aldea, C., Gimeno, C. y Cascarosa, E. (2019). ICT-based didactic strategies to build knowledge models in electronics in higher education. En *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2019* (pp. 1- 5). <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2019.8702527> ↑Ver página 204
- [Seeling, 2016] Seeling, P. (2016). Switching to blend-Ed: Effects of replacing the textbook with the browser in an introductory computer programming course. En *Proceedings - Frontiers in Education Conference, FIE, 2016* (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1109/FIE.2016.7757620> ↑Ver página 203
- [Sheard *et al.*, 2013] Sheard, J., Simon, Carbone, A., D'Souza, D. y Hamilton, M. (2013). Assessment of programming: Pedagogical foundations of exams. En *Proceedings of the 18th ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education* (pp. 141-146). <https://doi.org/10.1145/2462476.2465586> ↑Ver página 208

- [Suárez Valencia *et al.*, 2015] Suárez Valencia, E., Bucheli, V., Zarama, R. y Garcia, Á. (2015). Collective intelligence: Analysis and modelling. *Kybernetes*, 44(6/7), 1122-1133. <https://doi.org/10.1108/K-11-2014-0245> ↑Ver página 204, 205
- [Sun *et al.*, 2019] Sun, Q., Wu, J., Rong, W. y Liu, W. (2019). Formative assessment of programming language learning based on peer code review: Implementation and experience report. *Tsinghua Science and Technology*, 24(4), 423-434. <https://doi.org/10.26599/TST.2018.9010109> ↑Ver página 204, 205
- [Tong *et al.*, 2020] Tong, Y., Kinshuk y Wei, X. (2020). Teaching design and practice of a project-based blended learning model. *International Journal of Mobile and Blended Learning*, 12(1), 33-50. <https://doi.org/10.4018/IJMBL.2020010103> ↑Ver página 204
- [Trivodaliev *et al.*, 2017] Trivodaliev, K., Stojkoska, B. R., Mihova, M., Jovanov, M. y Kalajdziski, S. (2017). Teaching computer programming: The Macedonian case study of functional programming. En *IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON* (pp. 1282-1289). <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2017.7943013> ↑Ver página 207
- [Viberg *et al.*, 2020] Viberg, O., Mavroudi, A., Fernaeus, Y., Bogdan, C. y Laaksolahti, J. (2020). Reducing free riding: CLASS - A system for collaborative learning assessment. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1008, 132-138. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23884-1_17 ↑Ver página 204
- [Vychezhzhanin y Kotelnikov, 2019] Vychezhzhanin, S. y Kotelnikov, E. (2019). Comparison of named entity recognition tools applied to news articles. En *Proceedings - 2019 Ioannikov Ispras Open Conference, ISPRAS 2019* (pp. 72-77). <https://doi.org/10.1109/ISPRAS47671.2019.00017> ↑Ver página 199
- [Xie *et al.*, 2020] Xie, J., Lu, Y., Gao, R., Zhu, S.-C. y Wu, Y. N. (2020). cooperative training of descriptor and generator networks. En *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 42(1), 27-45. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2018.2879081> ↑Ver página 205
- [Zhang *et al.*, 2020] Zhang, M., Yu, Z., Sun, Y., Gong, X. y Liu, Y. (2020). The construction and application of hybrid teaching model of flipping classroom and divided classroom base on project-driven in the teaching of Java programming. *Journal of Physics: Conference Series*, 14 53(1) <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1453/1/012016> ↑Ver página 208



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>