

EDITORIALCÉSAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE
DIRECTOR**INVESTIGACIÓN****Modeling of Heterogeneous Objects: An Approach Based on Implicit Functions**

Modelado de objetos heterogéneos: una propuesta con base en funciones implícitas

MILLER GÓMEZ-MORA, LEONARDO FLÓREZ-VALENCIA

Collective Multi-Agent Navigation Model Based on Bacterial Quorum Sensing

Modelo de navegación colectiva multi-agente basado en el Quorum Sensing bacterial

EDUAR JACINTO GÓMEZ, MAURICIO GIRA², FREDY HERNÁN MARTÍNEZ SARMIENTO**Predicción de radiación solar mediante *deep belief network***

Solar Insolation Prediction through Deep Belief Network

LUIS CARLOS RUIZ CÁRDENAS, DARÍO AMAYA HURTADO², ROBINSON JIMÉNEZ MORENO**Distribución óptima de turbinas en parques eólicos mediante PSO considerando el efecto sombra**

Optimal Distribution of Wind Farm Turbines

Using PSO Considering the Wake Effect

JUAN DAVID RAMÍREZ RAMÍREZ, ALEJANDRO GARCÉS RUIZ, JOSE SANTIAGO ARRIETA GIRALDO

Una propuesta para la clasificación emocional de un álbum a partir de la letra de sus canciones

A Proposal for the Emotional Classification of an Album Using the Lyrics of its Songs

FRANCISCO JAVIER MORENO ARBOLEDA, JOHN FREDDY DUITAMA MUÑOZ, LUIS FERNANDO MONTOYA GÓMEZ

Desempeño ambiental de recintos habitacionales. Comparación de simulaciones, monitorización y percepción de residentes en seis viviendas de Concepción, Chile

Environmental Performance of Residential Rooms. Comparison between Simulations, Monitoring and Perception of Dwellers in Six Houses of Concepcion, Chile

RODRIGO GARCÍA ALVARADO, RODRIGO HERRERA OJEDA, CRISTIÁN MUÑOZ VIVEROS, GERTH WANDERSLEBEN

11 Modelación de la producción primaria fitoplanctónica en el humedal Jaboque, Bogotá D.C.

Modeling of primary production of phytoplankton in the wetland Jaboque, Bogotá D.C.

JULIO EDUARDO BELTRÁN VARGAS

15 ESTUDIO DE CASO**Detección de defectos en textiles mediante técnicas espaciales para análisis de textura**

Defect detection in textiles using special techniques for texture analysis

JOSÉ DAVID ALVARADO MORENO

29 Estudio exploratorio del tratamiento de agua de lavado de tintas por método de electrocoagulación/electroflotación

Exploratory Study of Dye Wastewater Treatment through the Electrocoagulation/Electroflotation Method

MARÍA CAMILA GARCÍA VACA, CÉSAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE, JUAN SEBASTIÁN DE PLAZA SOLÓRZANO

REVISIÓN**49 Tomografía computarizada: proceso de adquisición, tecnología y estado actual**

Computed tomography: acquisition process, technology and current state

YURI HERCILIA MEJÍA MELGAREJO, HENRY ARGUELLO FUENTES, ÓSCAR JAVIER ESPITIA MENDOZA

57 Instrucciones para los autores

Instructions for authors

SUSCRIPCIÓN

SIGN UP

85

97

107

119

137

145

153

154

Tecnurap-ISSN: 0123-921X
Volumen 20 - Número 47
Enero - Marzo de 2016Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad TecnológicaUNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDASRevista Tecnura • Volumen 20 - Número 47 • Enero - Marzo de 2016
p-ISSN: 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

Automatic orchestration of converged services on jslee environment

Metodología para el uso de la técnica de localización de raíces en la planeación de rutas para robots mobile

Control óptimo inverso como alternativa para la regulación de un convertidor DC-DC elevador

ISSN 0123-921X
9 770123 921001

Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Vol. 20 No. 47
Enero - Marzo de 2016
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

COMITÉ EDITORIAL

Ph.D. Ing. Electo Eduardo Silva
Universidad Federal de Itajuba, Brasil

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

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

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

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

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

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

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

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

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

COMITÉ CIENTÍFICO

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

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

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

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

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

Ph.D. Ing. Graciela Perera Olivares
Youngstown University, Estados Unidos

Ph.D. Ing. Clara Inés Buritica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

EVALUADORES

Postdoctor. Ing. Neil Guerrero Gonzales
Universidad de Cork, Irlanda

Ph.D. Ing. Carlos Alberto Restrepo Patiño
Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

Ph.D. Ing. Enrique Alegre Gutiérrez
Universidad de León, España

Ph.D. Ing. Fernando Sánchez Lasheras
Universidad de Oviedo, España

Ph.D. Ing. Joaquín Barreiro García
Universidad de León, España

Ph.D. Ing. Lina Mabel Castro Heredia
Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

Ph.D. Ing. Oscar Rodríguez Rocha
Politecnico di Torino, Italia

Ph.D. Ing. Robinson Alberto Medina Sánchez
Universidad de Cundinamarca, Colombia

Ph.D. Ing. Rubén Darío Hernández Beleño
Universidad Politécnica de Colombia, Colombia

Ph.D(c). Ing. Juan Pablo Rodríguez Miranda
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

M.Sc. Ing. Cristian Camilo Viasus Figueredo
Universidad de los Andes, Colombia

M.Sc. Ing. Eduardo Ojeda Burbano
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

M.Sc. Ing. Fernando Augusto Diaz Ortiz
Universidad Central, Colombia

M.Sc. Ing. Jhon Jairo Galvis
Universidad de los Andes, Colombia

M.Sc. Lic. Johny Roberto Rodríguez Pérez
Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia

M.Sc. Ing. José David Cortes Torres
Universidad Industrial de Santander, Colombia

ASISTENTES DE LA REVISTA TECNURA

M.Sc (c). Hans Raúl Márquez Ramos

M.Sc (c). Diego Armando Giral Ramírez

COORDINACIÓN EDITORIAL

Diony Constanza Pulido Ortega
Centro de investigaciones y desarrollo tecnológico - CIDC
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Tecnura

Vol. 20 No. 47

Enero - Marzo de 2017

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 el Índice Bibliográfico Nacional Publindex (IBN) de Colciencias (Colombia) en la categoría A2, 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), 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 compra, canje o suscripción.

SUSCRIPCIÓN

El precio unitario de la revista es de 10000 pesos (el precio no incluye el valor del envío). La suscripción anual tiene un costo de 45000 pesos para Colombia, 40 USD para América Latina y el Caribe, 60 USD para otras regiones (el precio incluye el valor del envío). Para suscribirse utilice el formato ubicado al final 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 - 3238400, extensión: 5003
Celular: 57 - 3153614852
Bogotá, D.C., Colombia
Correo electrónico: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com
Tecnura en internet: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

DISEÑO ORIGINAL

Julián Hernández - Taller de Diseño

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA ESPAÑOL

Fernando Carretero Padilla

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLÉS

Francisco Suárez Díaz

DIAGRAMACIÓN ELECTRÓNICA Y DISEÑO DE CUBIERTA

Julián Hernández - Taller de Diseño

IMPRESIÓN

Imprenta Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Formato: 21.5 x 28 cm
Papel: Bond 75g
Fuente: Times New Roman
Tiraje: 400 ejemplares



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

Tecnura
Technology And Culture, Affirming Knowledge
District University Francisco José De Caldas
Faculty Of Technology

EDITOR

Ph.D. Ing. Cesar Augusto García Ubaque
District Francisco José de Caldas University, Colombia

EDITORIAL COMMITTEE

Ph.D. Ing. Electo Eduardo Silva
Universidad Federal de Itajuba, Brasil

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

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

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

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

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

Ph.D. Ing. Jorge Mario Gomez
Universidad de los Andes, Colombia

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

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

Ph.D (c). Ing. Cesar Augusto Hernández Suárez
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

SCIENTIFIC COMMITTEE

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

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

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

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

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

Ph.D. Ing. Graciela Perera Olivares
Youngstown University, Estados Unidos

Ph.D. Ing. Clara Inés Buritica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

EVALUATORS

Postdoctor. Ing. Neil Guerrero Gonzales
Universidad de Cork, Irlanda

Ph.D. Ing. Carlos Alberto Restrepo Patiño
Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

Ph.D. Ing. Enrique Alegre Gutiérrez
Universidad de León, España

Ph.D. Ing. Fernando Sánchez Lasheras
Universidad de Oviedo, España

Ph.D. Ing. Joaquín Barreiro García
Universidad de León, España

Ph.D. Ing. Lina Mabel Castro Heredia
Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

Ph.D. Ing. Oscar Rodríguez Rocha
Politecnico di Torino, Italia

Ph.D. Ing. Robinson Alberto Medina Sánchez
Universidad de Cundinamarca, Colombia

Ph.D. Ing. Rubén Darío Hernández Beleño
Universidad Politécnica de Colombia, Colombia

Ph.D(c). Ing. Juan Pablo Rodríguez Miranda
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

M.Sc. Ing. Cristian Camilo Víasus Figueredo
Universidad de los Andes, Colombia

M.Sc. Ing. Eduardo Ojeda Burbano
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

M.Sc. Ing. Fernando Augusto Díaz Ortiz
Universidad Central, Colombia

M.Sc. Ing. Jhon Jairo Galvis
Universidad de los Andes, Colombia

M.Sc. Lic. Johny Roberto Rodríguez Pérez
Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia

M.Sc. Ing. José David Cortes Torres
Universidad Industrial de Santander, Colombia

TECNURA JOURNAL ASSISTANTS

M.Sc (c). Hans Raúl Márquez Ramos

M.Sc (c). Diego Armando Giral Ramírez

EDITORIAL COORDINATION

Diony Constanza Pulido Ortega

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

Tecnura

Vol 20 No. 47

January - March de 2016

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 Índice Bibliográfico Nacional Publindex (IBN) from Colciencias (Colombia) in the category A2, 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.

SIGN UP

The unit price of the journal is 6 USD (the price does not include shipping). The annual sign up is 28 USD for Colombia; 40 USD in Latin America and the Caribbean; 60 USD in other regions (the price includes shipping). To sign up, use the format located at the end of the journal.

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 - 3238400, extension: 5003
Cell phone Number: 57 - 3153614852
Bogotá D.C., Colombia
E-mail: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com
Tecnura on internet: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

ORIGINAL DESIGN

Julián Hernández - Taller de Diseño

STYLE CORRECTION IN SPANISH

Fernando Carretero Padilla

STYLE CORRECTION IN ENGLISH

Francisco Suárez Díaz ELECTRÓNIC

LAYOUT AND TITLE PAGE DISEGN

Julián Hernández - Taller de Diseño

PRINTED BY

Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas Press
Format: 21.5 x 28 cm
Paper: Bond 75g
Font: Times New Roman
Printing: 400 copies

DECLARACIÓN DE ÉTICA Y BUENAS PRÁCTICAS

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 confluían 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.

CODE OF ETHICS AND GOOD PRACTICE

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 research 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 publish 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

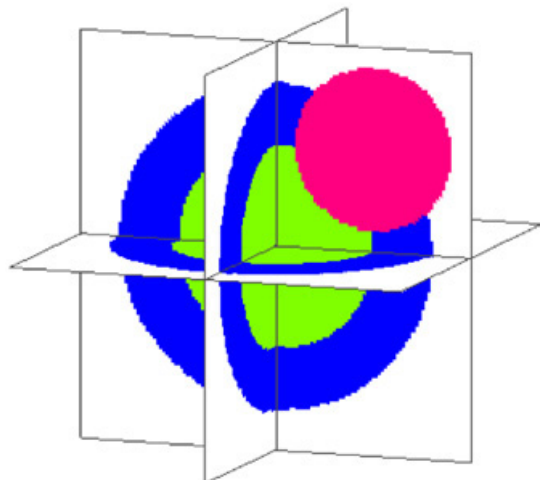
Any author, reader, reviewer or editor may refer their complaints to the competent authorities.

Contenido

EDITORIAL

11

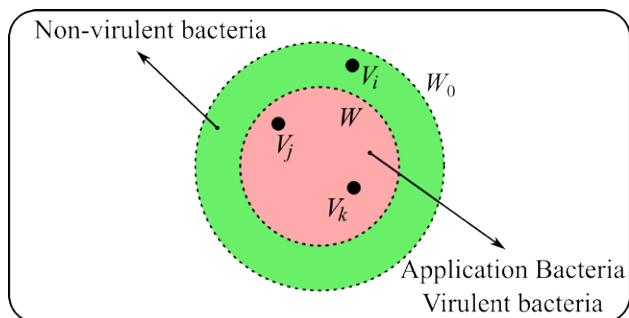
INVESTIGACIÓN



Modeling of Heterogeneous Objects: An Approach Based on Implicit Functions 15

Modelado de objetos heterogéneos: una propuesta con base en funciones implícitas

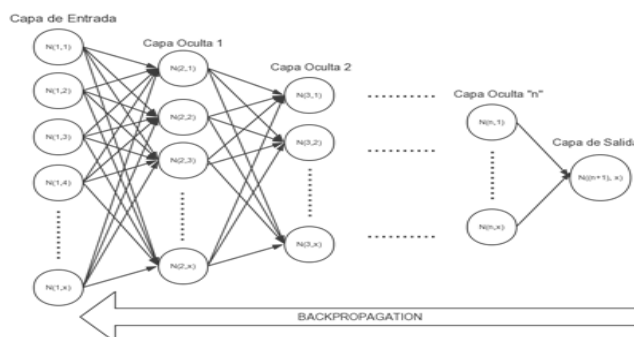
MILLER GÓMEZ-MORA, LEONARDO FLÓREZ-VALENCIA



Collective Multi-Agent Navigation Model Based on Bacterial Quorum Sensing 29

Modelo de navegación colectiva multi-agente basado en el Quorum Sensing bacterial

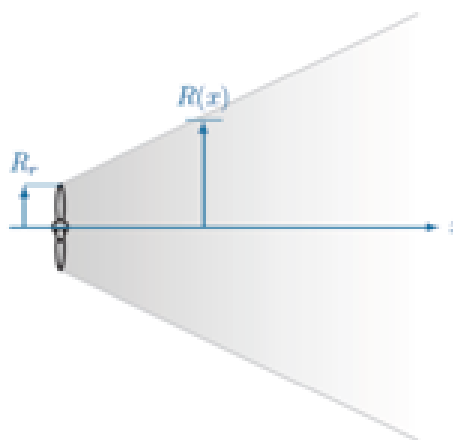
EDUAR JACINTO GÓMEZ, MAURICIO GIRA², FREDY HERNÁN MARTÍNEZ SARMIENTO



Predicción de radiación solar mediante deep belief network 39

Solar Insolation Prediction through Deep Belief Network

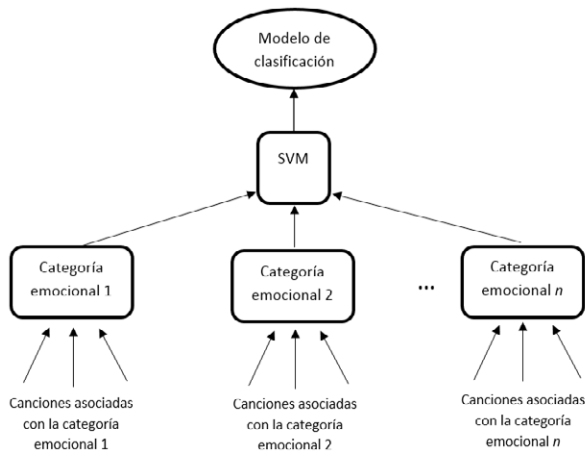
LUIS CARLOS RUIZ CÁRDENAS, DARÍO AMAYA HURTADO², ROBINSON JIMÉNEZ MORENO



Distribución óptima de turbinas en parques eólicos mediante PSO considerando el efecto sombra 49

Optimal Distribution of Wind Farm Turbines Using PSO Considering the Wake Effect

JUAN DAVID RAMÍREZ RAMÍREZ, ALEJANDRO GARCÉS RUIZ, JOSE SANTIAGO ARRIETA GIRALDO



Una propuesta para la clasificación emocional de un álbum a partir de la letra de sus canciones

57

A Proposal for the Emotional Classification of an Album Using the Lyrics of its Songs

FRANCISCO JAVIER MORENO ARBOLEDA, JOHN FREDDY DUITAMA MUÑOZ, LUIS FERNANDO MONTOYA GÓMEZ

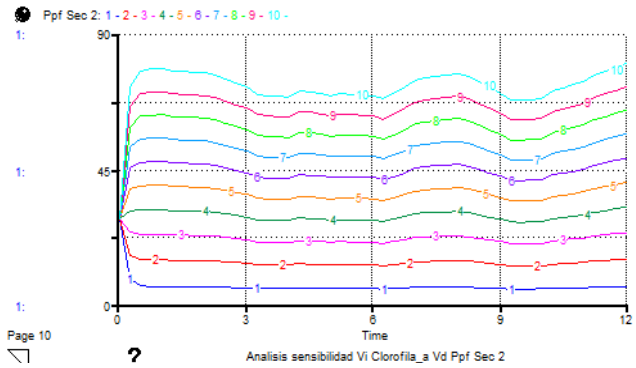


Desempeño ambiental de recintos habitacionales. Comparación de simulaciones, monitorización y percepción de residentes en seis viviendas de Concepción, Chile

71

Environmental Performance of Residential Rooms. Comparison between Simulations, Monitoring and Perception of Dwellers in Six Houses of Concepcion, Chile

RODRIGO GARCÍA ALVARADO, RODRIGO HERRERA OJEDA, CRISTIÁN MUÑOZ VIVEROS, GERTH WANDERSLEBEN

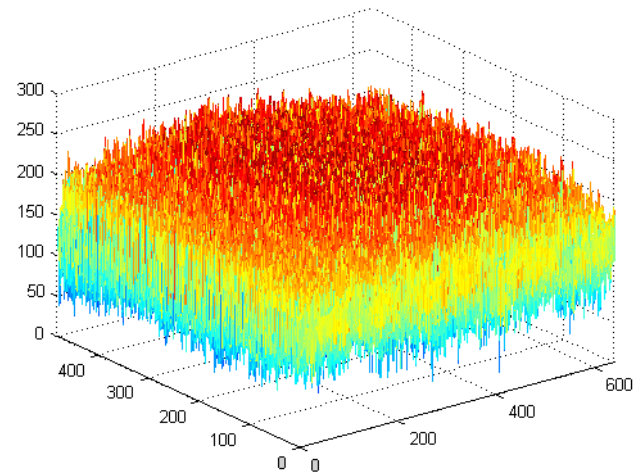


Modelación de la producción primaria fitoplanctónica en el humedal Jaboque, Bogotá D.C.

85

Modeling of primary production of phytoplankton in the wetland Jaboque, Bogotá D.C.

JULIO EDUARDO BELTRÁN VARGAS

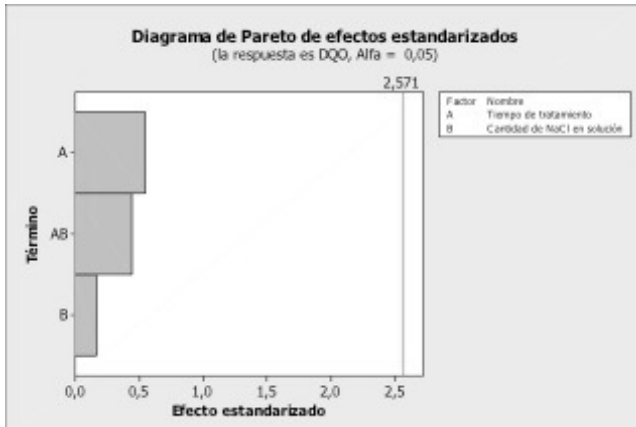


Detección de defectos en textiles mediante técnicas espaciales para análisis de textura

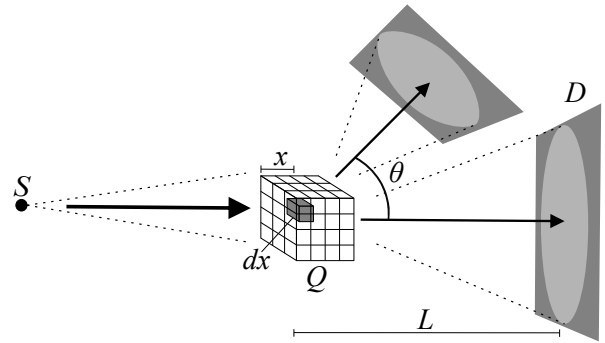
97

Defect detection in textiles using special techniques for texture analysis

JOSÉ DAVID ALVARADO MORENO



Estudio exploratorio del tratamiento de agua de lavado de tintas por método de electrocoagulación/electroflotación	107
Exploratory Study of Dye Wastewater Treatment through the Electrocoagulation/ Electroflotation Method	
MARÍA CAMILA GARCÍA VACA, CÉSAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE, JUAN SEBASTIÁN DE PLAZA SOLÓRZANO	



Tomografía computarizada: proceso de adquisición, tecnología y estado actual	119
Computed tomography: acquisition process, technology and current state	
YURI HERCILIA MEJÍA MELGAREJO, HENRY ARGUELLO FUENTES, ÓSCAR JAVIER ESPITIA MENDOZA	

Instrucciones para los autores	137
Instructions for authors	145
SUSCRIPCIÓN	153
SIGN UP	154

Una de las razones por las cuales la problemática ambiental se ha convertido en una prioridad para casi todos los países es la implicación que tiene la carga de enfermedad generada por factores ambientales, que se concentra a su vez en las poblaciones más vulnerables. Se calcula que el 24% de la carga de morbilidad mundial y el 23% de todos los fallecimientos pueden atribuirse a los factores ambientales. En los niños de 0 a 14 años el porcentaje de muertes que podría atribuirse al medio ambiente era de 36% (Prüss-Üstin & Corvalán, 2006).

Entre las enfermedades con mayor carga absoluta atribuible a factores modificables son la diarrea, infección de vías respiratorias inferiores, lesiones accidentales y paludismo. Para el caso de la enfermedad diarreica aguda, su carga de morbilidad está asociada en aproximadamente en un 94% a factores ambientales tales como el consumo de agua no potable, el saneamiento y la higiene insuficientes (Prüss-Üstin & Corvalán, 2006). Se encuentran patrones similares de mortalidad infantil y cobertura de agua potable y saneamiento, siendo este un indicador importante en salud ambiental en general (Organización Panamericana de la Salud, 2000).

Cuando se comparan los patrones de morbilidad y mortalidad relacionados con el ambiente en diferentes países, se aprecian diferencias significativas según el nivel de desarrollo de la población donde se presenta la exposición. La evidencia muestra que mientras la mortalidad por enfermedades relacionadas con causas ambientales en países en desarrollo fue de 25%; en los países desarrollados la mortalidad por la misma causa fue 17%. Asimismo, al comparar los años de vida perdidos por habitante debido a factores ambientales se encuentra que este indicador es 15 veces mayor en los países en desarrollo. Se aprecia también un 120 % más por enfermedades diarreicas y un 150% más por causa de enfermedades

respiratorias inferiores (Prüss-Üstin & Corvalán, 2006) (Prüss-Üstin & Corvalán, 2006).

Este panorama ha puesto nuevamente sobre la mesa la necesidad de articular las políticas, planes y programas de los sectores de *Salud y Medio Ambiente* en muchos países del mundo, en un área del conocimiento transdisciplinar conocida como SALUD AMBIENTAL.

En Colombia han sucedido algunos hechos un tanto contradictorios. Mientras que en las décadas de los 70s y 80s el sector salud tenía a su cargo muchos programas de manejo y control ambiental por causa de la Ley 09 de 1979 y sus decretos reglamentarios; en la década de los 90s a partir de la cumbre de Rio cuando se crearon el Ministerio del Medio Ambiente y el Sistema Nacional Ambiental, la legislación promulgada desde la ley 99 de 1993 dividió y desarticuló las competencias entre salud y ambiente. A pesar de esta situación, las mismas entidades de salud y ambiente han venido enmendando el error a través de mesas de trabajo intersectorial y han retomado el norte en cuanto a las funciones intrínsecas que comparten.

En los últimos años, el país ha logrado un importante desarrollo del marco legal que regula la salud ambiental. El CONPES 3550 de 2008 definió 17 componentes de salud ambiental que deben ser sujeto de las normas, la política y la práctica de protección integral de la salud. Estos componentes son: agua potable, saneamiento básico en higiene, recursos hídricos y contaminación, desechos sólidos y protección del suelo, contaminación atmosférica, inocuidad de los alimentos, salud y seguridad ocupacional, seguridad química y desechos peligrosos, entornos de vivienda y espacios saludables, control de vectores y salud pública veterinaria, radiación ionizante y no ionizante, contaminación por ruido, turismo y salud ambiental, planificación urbana y uso del suelo, seguridad en el transporte, calidad de medicamentos, aspectos ambientales globales, y desastres naturales.

De otra parte, el Plan Decenal de Salud Pública 2012-2021 plantea las siguientes dimensiones: salud ambiental, vida saludable y condiciones no transmisibles, convivencia social y salud mental, seguridad alimentaria y nutricional, sexualidad, derechos sexuales y reproductivos, vida saludable y enfermedades transmisibles, salud pública en emergencias y desastres, salud y ámbito laboral. En cada una de las dimensiones anteriores se plantean objetivos, metas y estrategias.

Se percibe que la organización de los servicios de salud ambiental se ha hecho más compleja en términos de los recursos, las actividades y el talento humano de este sector. Específicamente, el Decreto 4107 de 2011 en el Artículo 27 propone cinco ejes para la gestión del talento humano relacionado con salud: a) formulación de políticas de formación, ejercicio y desempeño del talento humano en salud, b) diseñar y coordinar la política de formación y capacitación del talento humano en salud, c) velar por el mejoramiento del talento humano para mejorar su eficiencia y productividad en el trabajo, d) diseñar y desarrollar estrategias para la

investigación aplicada y evaluación de tecnologías destinadas al mejoramiento del talento humano, y e) adelantar los estudios sobre composición, distribución e incentivos para el talento humano.

En este contexto, vale la pena resaltar que en la actualidad no se cuenta con suficiente información sobre las características en términos de formación y desempeño sobre el talento humano en materia de salud ambiental que debe atender cada uno de estos temas. Es importante resaltar también que el éxito de la implementación de políticas en cualquier área de desempeño en la actividad humana y el desarrollo mismo de los programas está mediado de una manera significativa por el papel que juega el talento humano en su interpretación y puesta en marcha, y que a su vez terminan siendo los actores de un área del conocimiento; y es aquí donde las Instituciones de Educación Superior IES, incluyendo nuestra Universidad Distrital, están llamadas a dar una respuesta ante la necesidad de formación de este talento humano, y que bien podría ser este el campo que permita estructurar nuestra futura facultad de ciencias de la salud.

César Augusto García-Ubaque
Director

One of the reasons why the environmental issue has become a priority for almost all the countries is the implication of its illness load generated by environment factors, concentrated in turn in the most vulnerable populations. It is estimated that 24% of world morbidity and 23% of all deaths can be attributed to environmental factors. In children from 0 to 14 years old the percentage of deaths that could be attributed to environment was 36% (Prüss-Üstin & Corvalán, 2006).

Among the illnesses with the highest absolute attributable load to modifiable factors are diarrhea, lower respiratory infections, accidental injuries and malaria. In the case of intense diarrheic illness, its morbidity load is associated in approximately 94% to environmental factors such as the consumption of non-potable water, and insufficient sanitation and hygiene (Prüss-Üstin & Corvalán, 2006). Similar patterns of children morbidity and potable water and sanitation coverage are found, being an important indicator in environmental health in general (Organización Panamericana de la Salud, 2000).

When comparing the morbidity patterns and death related to the environment in different countries, meaningful differences are observed according to the development level of the population where the exposition takes place. The evidence shows that while mortality for diseases related to environmental issues in developing countries was 25%, in the developed countries mortality for that same cause was 17%. Likewise, when comparing the lost years of life per inhabitant due to environmental factors, we find this indicator is 15 times higher in developing countries. 120% more for diarrheic diseases and 150% more due to lower respiratory illnesses is noted (Prüss-Üstin & Corvalán, 2006) (Prüss-Üstin & Corvalán, 2006).

This outlook has once again set the need to articulate policies, plans and programs of *Health and*

Environment sectors in many countries around the world, in an area of transdisciplinary knowledge known as ENVIRONMENTAL HEALTH.

In Colombia some contradictory events have occurred. While in the 70s y 80s the health sector was in charge of many environmental management and control programs due to Act 09, 1979 and its mandatory decrees, in the 90s, from Rio Summit, and the Environment Ministry and the National Environment System were created, the published legislation since Act 99 de 1993 divided and disarticulated the competences among health and environment. In spite of this situation, the same health and environment institutions have been amending the error through intersectorial roundtables, and have redirected their path in terms of the intrinsic functions they share.

In recent years, the country has achieved an important development in the legal framework that regulates the environmental health. CONPES 3550, 2008 defined 17 components of environmental health that must be subject to norms, policies and health integral protection practice. These components are: potable water, basic sanitation in hygiene, water resources and contamination, solid wastes and soil protection, atmospheric contamination, food innocuousness, occupational health and security, chemical security and hazardous waste, housing environments and healthy spaces, vectors control and veterinary public health, ionizing and non-ionizing radiation, noise contamination, tourism and environmental health, urban planning and ground use, transport security, medicine quality, worldwide environmental aspects, and natural disasters. In the other hand, Public Health Decennial Plan 2102-2021 states the following dimensions: environmental health, healthy life and non-transmissible conditions, social cohabitation and mental health, food and nutritional security, sexuality, sexual and reproductive rights, healthy life and

transmissible diseases, public health in emergencies and disasters, health and labor area. Objectives, goals and strategies are established for each one of the previous dimensions.

It is perceived that the organization in environmental health services has become more complex in terms of the resources, the activities and the human talent of this sector. Specifically, decree 4107, 2011, Article 27 proposes five central concepts for human talent management related to health: a) policies formulation for formation, practice and performance of human talent in health, b) design and coordinate the formation and training policy of human talent in health, c) protect the improvement of human talent to improve its efficiency and productivity at work, d) design and develop strategies for applied research and evaluation of technologies aimed at the improvement of human talent, and e) advance in studies on

composition, distribution and incentives for human talent.

In this context, it is worth highlighting that currently there is no sufficient information about the characteristics in terms of the formation and performance on human talent regarding environmental health that must pay attention to each one of these topics. It is also important to underline that the success of the implementation of policies in any performance area in the human activity and the very development of the programs is mediated significantly by the role played by human talent in its interpretation and start-up, who in turn end up being the actors of a knowledge area; and here is when High Education Institutions (IES in Spanish), including Universidad Distrital, are called to answer the need for formation of this human talent, and this could be the field that allows structuring our future Faculty of Healthy Sciences.

César Augusto García-Ubaque
Director



Modeling of Heterogeneous Objects: An Approach Based on Implicit Functions

Modelado de objetos heterogéneos: una propuesta con base en funciones implícitas

Miller Gómez-Mora¹, Leonardo Flórez-Valencia²

Fecha de recepción: 22 de febrero de 2015

Fecha de aceptación: 18 de septiembre de 2015

Cómo citar: Gómez-Mora, M., & Flórez-Valencia, L. (2016). Modeling of heterogeneous objects: An approach based on implicit functions. *Revista Tecnura*, 20(47), 15-27. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a01

Abstract

Modeling objects, their properties and relations is an important topic in computer science. In this sense, this research contributes to the framework of heterogeneous solid modeling, as well as the popular and intricate study of implicit solid representation. The approach presented here is broad and generic, but this article will focus on bio-CAD models, alluding to the existing extension and implementation in other fields. The overall aim of this work is to demonstrate that solid models of heterogeneous object can be built implicitly. This is shown to have promise in practical applications from biomedical computing to computer animation and engineering. The approach adopted here is based on the observation that current solid models cannot intrinsically represent multiphase geometric information along with the attribute information. This makes necessary to explore new modeling techniques in order to represent real-world objects. The availability of such modeling techniques remains central to the design, analysis, and fabrication of heterogeneous objects

Keywords: Geometric modeling, heterogeneous objects, implicit representation.

Resumen

El modelado de objetos, sus propiedades y relaciones es un tema importante en las ciencias de la computación y la informática. En ese sentido, esta investigación busca contribuir al modelado de objetos sólidos heterogéneos, así como al complejo estudio de la representación implícita de objetos sólidos. El enfoque que aquí se presenta es amplio y genérico, pero este artículo se centra en modelos bio-CAD, aludiendo su extensión y aplicación a otros campos. El objetivo general de este trabajo es demostrar que los modelos geométricos de objetos heterogéneos se pueden representar de forma implícita. Esto promete tener gran variedad de aplicaciones prácticas desde la computación biomédica hasta la animación por computador y la ingeniería aplicada. El enfoque adoptado aquí se basa en la observación de que los modelos sólidos actuales no pueden representar intrínsecamente información

¹ System Engineer, specialist in Teleinformatics, master of Science in Information and Communications, doctor candidate in engineering. Associate professor at the Distrital University Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contact: mgomez@udistrital.edu.co

² Computer and System Engineer, master in Computer and System Engineering. Degree of DEA (Diplôme d'Etudes Approfondies) in images and systems, doctor degree in images and systems. Associate professor at the Javeriana University. Bogotá, Colombia. Contact: florez-l@javeriana.edu.co

geométrica multifase junto con la información de los atributos. Esto hace necesario explorar nuevas técnicas de modelado para representar objetos del mundo real. La disponibilidad de este tipo de modelos es

fundamental para el diseño, análisis y fabricación de objetos heterogéneos.

Palabras clave: Modelado geométrico, objetos heterogéneos, representación implícita.

INTRODUCTION

Most objects, natural or man-made, contain multiple materials within complex volumetric structures organized in complicated geometric configurations. We refer to these objects as heterogeneous objects. Modeling heterogeneous objects can help us gain a better understanding of the physical world. The following is a set of application domains where reliable models of such objects will be of great demand:

- Reverse engineering: The geometry of a real part is scanned to create a CAD/CAM representation; this model can then be used for further editing and integration with other modeled parts, as well as for simulation purposes.
- Diagnostics: Nowadays, visualization of volume scans is an important tool in medical diagnostics. Shape and size of internal organs can be segmented from the volume data; this and additional information derived from the scans (mass density distribution, speed of blood flow, etc.) can provide much more insight into body-internal structures and processes than conventional examination methods.
- E-commerce: With the rise of Internet shopping, models of real objects need to be transmitted to potential buyers. Animation: Models of characters and props can be used in film production for creation of special effects.

Besides the reverse engineering techniques, the ongoing development in the field of medical imaging modalities such as computed tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI), have made the computer aided technologies to

be used extensively in modern medicine and biomedical engineering. For instance, the medical industry uses detailed models of organs in different applications such as tissue engineering, part modeling and visualization, surgical simulation and planning, as well as manufacturing of various accessories and patient specific prosthesis (Sun, Starly, Nam, & Darling, 2005). This leads to the need of new image-based bio-CAD applications to improve diagnosis, treatment and prevention of diseases.

The basic and most widely used format for generating 3D models is a volumetric voxel model (Sun, Darling, Starly, & Nam, 2004), which is currently considered to be the most accurate representation of natural objects including the human anatomy (Caon, 2004). Although voxel models produce rather realistic renderings of such objects, the memory overhead of these models is too large as to be restrictive. What's more, voxel models lack geometric representation making them unsuitable for bioengineering design and engineering analysis (Gómez-Mora & Flórez-Valencia, 2013). Consequently, extracting precise geometric models from medical images including the interfaces between different organs and tissues is important not only to visualize the internal structure of a specific region (Sun, Darling, Starly, & Nam, 2004), but also to mimic as closely as possible its properties in realistic physically-based simulations (Zaidi & Tsui, 2009).

Current situation in object representation

At the present time, most commercial solid modeling systems employ boundary representations (B-rep). The boundary representation model (B-Rep) is used to represent the shape of an object as a set

of connected surface elements (see figure 1-left). The B-Rep model consists of geometric and topological information. The geometric information includes a description of the points belonging to the surface of an object while the topological information specifies the connections between the points on the surface. The most common type of B-Rep is the polygonal representation. A model of a polygon (G) consists of a set of vertices (V), edges (E) and faces (F) (Van Dam, Feiner, McGuire, & Sklar, 2013).

$$\begin{aligned}
 G &= \{V, E, F\} \\
 V &= \{v_1, \dots, v_n\} \\
 E &= \{e_1, \dots, e_m\}; e_i = \{j, k\}; 0 < j, k \leq n \quad (1) \\
 F &= \{f_1, \dots, f_l\}; f_i = \{e_j, e_k, \dots, e_p\}; 0 < j, k, p \leq m
 \end{aligned}$$

For example, figure 1-left illustrates a B-rep tetrahedral solid. B-rep representation is well suited for visual display since most modern computer video cards support hardware acceleration for polygon drawing.

Existing bio-CAD models are usually solid models defined by the bounding surfaces that enclosed the regions-of-interest (ROI) using a B-Rep, and based on the premise of material homogeneity model (Sun, Darling, Starly, & Nam, 2004). However,

point membership classification for B-rep models requires a global computation, i.e. testing the position of the point in relation to each surface patch.

An approach base on implicit functions

Instead of an explicit B-Rep modeling, this research focused on an alternative representation scheme known as implicit solid modeling that offers very straightforward methods for object representation and point classification. An object can be defined by a scalar function defined on d-dimensional Euclidean space with an inequality (Bajaj, 1997):

$$F(\mathbf{p}) = f(\mathbf{p}) < T; T \in \mathbb{R}; \mathbf{p} \in \mathbb{R}^d; f(\mathbf{p}): \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R} \quad (2)$$

where T is a threshold value. The subset $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^d; f(\mathbf{p}) \leq T$ is called solid object and the subset $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^d; f(\mathbf{p}) = T$ is called iso-surface (see figure 1-right). A point is classified by evaluating the implicit function at that point. If the output is negative then the point is inside; if the output is positive then the point is outside; and if the output is zero then the point lies right on the surface of the solid.

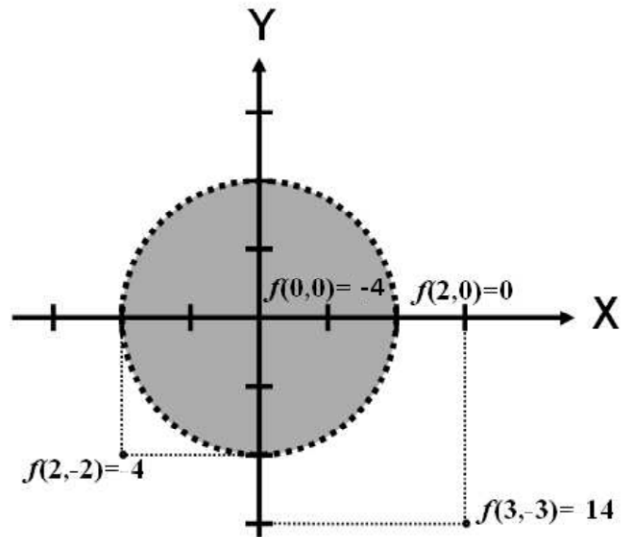
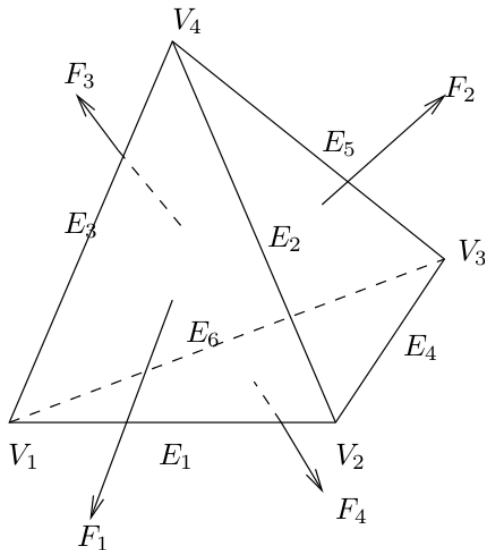


Figure 1. Examples of a B-Rep model and an implicit function

Source: Own work

There are many ways to define f . On one hand, it can have a closed analytical form, for example, the zero level-set of the function $f(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 - 2 = 0$ defines a sphere of radius 2, classifying the space into two half-spaces $f > 0$ and $f < 0$. On the other, an implicit function f can also be defined through data-driven methods taking the form of a signed distance field (Hoppe, DeRose, Duchamp, McDonald, & Stuetzle, 1992), or indicator function (Kazhdan, Bolitho, & Hoppe, 2006).

However, when multiple regions are presented inside the object (see figure 2, and figure 3-left), building and querying the implicit solid is a difficult problem.

In order to give form to the proposed research, the work focused on the following research questions:

- How to create a solid geometric model of a heterogeneous object that not only capture the outer geometry accurately, but also contain information of the inner region interfaces?
- What algorithms and methods must be introduced to be capable of implicitly representing heterogeneous objects with multiple internal regions?

Answering those two questions should also lead to answering a third question:

- How to calculate the interfaces of all inner material regions belonging to the heterogeneous object defined by a set of unstructured labeled points in R^3 ?

The main hypothesis that drove the research was:

- A solid modeling method based on implicit functions represents segmented multi-material volumes of heterogeneous objects efficiently and accurately.

We have taken into account that models based on an implicit representation are compact and resolution independent, and can provide specific accuracy to efficient geometry and material queries (Kou X. Y., 2007). Additionally, if the need arises, they can become explicit models using a voxel, or a finite element based representation. Because of the mathematical description, these models are concise, compact and suitable for design, simulation, and manufacturing.

Problem definition

Following the representation method in (Wang & Wang, 2005) without loss of generality, a real-world object can be model as a heterogeneous solid η in a given geometric domain $\Omega \in R^3$ defined by a function $f(p)$ with $p \in \Omega$.

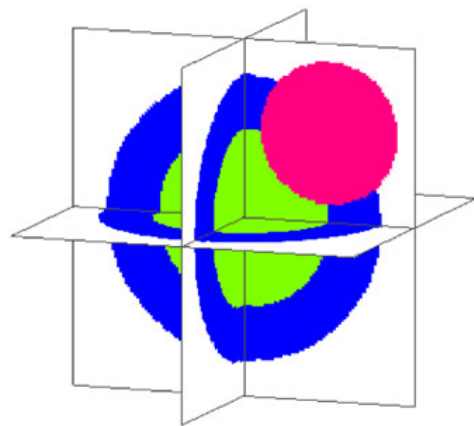
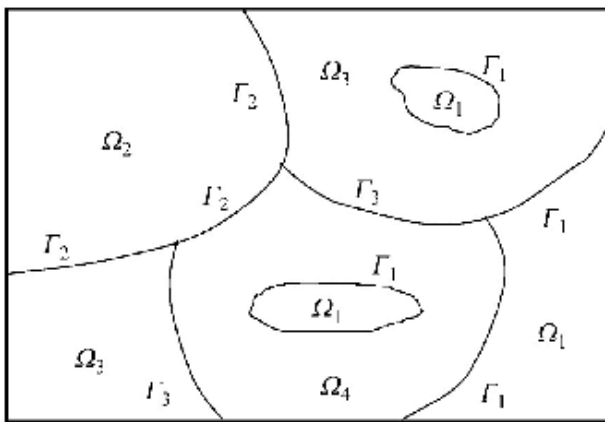


Figure 2. Complex heterogeneous objects in 2D and 3D

Source: Left (Wang & Wang, 2005), right (Wang C. C., 2007).

If there are a total of n materials involved in Ω , the value of $f(p)$ is an integral index of material class between 0 and n (zero represents no material), which indicates the material type in Ω at p . Suppose that a region filled with the material class i is denoted by Ω_i , we have that

$$\eta = \bigcup_{i=1}^n \Omega_i \quad (3)$$

is the complement of Ω_0 in Ω . Thus, the heterogeneous object η is partitioned by regions with unique material i (see figure 2).

Suppose that the material region Ω_i has a meaningful boundary surface $\Gamma_i = \delta\Omega_i\eta$, then the interface between two material regions Ω_i and Ω_j is denoted by $\Omega_i \neq j\Omega_j = \Gamma_i\Gamma_j = \Gamma_{ij} = \Gamma_{ji}$. Additionally, $\text{Vol}(\Omega_i\Omega_j) = 0; i \neq j$ meaning that the geometric domain Ω is a partition and any two material regions do not overlap except at their shared boundary, which has zero volume.

When the material region Ω_0 is considered all the intermediate surfaces in Ω representing the geometric model of η can be defined as

$$G_\eta = \sum_{i,j=0}^{n-1} (1 - \delta_{i,j})\Gamma_{i,j} \quad (4)$$

where G_η is the geometric model of η , and $\delta_{i,j}$ is the Kronecker delta defined to be 1 if $i = j$ and 0 (zero) otherwise. We remark that some interfaces $\Gamma_{i,j}$ may be empty, and G_η may not always be manifold, it can also be non-manifold curves and surfaces.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 gives a brief background of composite models for representing heterogeneous objects. Section 3 lays out our method based on implicit functions. Section 4 reports results that demonstrate the effectiveness of our approach for three-dimensional segmented medical images. Section 5 draws conclusions and outlines future research.

COMPOSITE MODELS

Despite the diversity in the geometric and material representations, most of cited heterogeneous

object models use a single (explicit, implicit, procedural or otherwise) mapping function to define the material distribution. Based on the idea of space partitions many researchers (Kumar, Burns, Dutta, & Hoffmann, 1999), (Chen & Feng, 2004), (Shin & Dutta, 2001), Kou 2006, (Cheng & Lin, 2005) propose composite models to represent such objects. Intuitively, a composite model can be seen as a collection or group of sub-objects (see figure 2), each sub-object belonging to a generic *material class* (Wang & Wang, 2005).

Mathematically, composite models can be described as:

$$O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\} \\ O_i = \{P = (P_g^{(i)}, P_m^{(i)})\}; F^{(i)}(P_g^{(i)}) = P_m^{(i)}; P_g^{(i)} \in \Omega_m^{(i)}; 1 \leq i \leq n \quad (5)$$

where O is a complex object, O_i is the i -th sub-object, $F^{(i)}(\cdot)$ is the i -th mapping function defined in the geometric sub-domain geometric $\Omega_g^{(i)}$, $\Omega_m^{(i)}$ is the i -th material domain and n is the number of sub-objects.

Assembly models

An assembly model is a natural and intuitive way to represent complex and heterogeneous objects. The whole object is modeled as a set and each part of the set is a sub-object with a unique material distribution. figure 3-center shows an assembly model of the object in figure 3-left, which is decomposed into a homogeneous solid and an FGM object.

To represent a heterogeneous object using the assembly model, spatial partitions must be established appropriate. There are at least two methods for accomplishing this. The constructive approach, which generates spatial divisions of the boundaries of existing primitives. Kumar and Dutta (Kumar V. a., 1997), and Hu and Sun (Sun W. a., 2002) proposed regularized operators (difference, intersection and union) and other operators to model the geometry of the assembly.

Alternatively, it is also possible to directly decompose existing geometries into separate

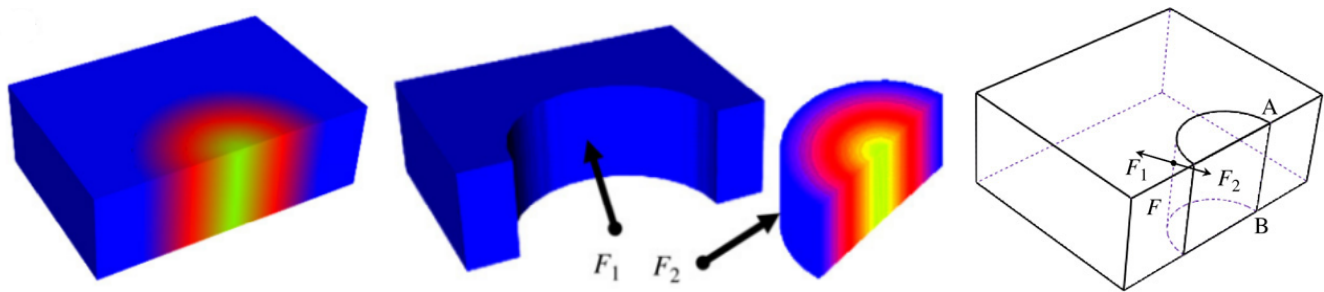


Figure 3. Composite models

Source: (Kou X. Y., 2007)

components interconnected. For example, Liu (Liu, Maekawa, Patrikalakis, Sachs, & Cho, 2004) in his feature-based scheme decomposes the geometry of an object with two surfaces bounded by spheres.

Assembly models are easy to understand and implement. However, despite the intuitiveness and ease of use, assembly models also suffer some inherent disadvantages. Qian and Dutta (Qian & Dutta, 2003) noted that the use of regularized Boolean operations on the space partition leads to unnecessary operations and 3D over-segmented regions. Kou (Kou, Tan, & Sze, 2006) also showed that strong data redundancy and low consistency of assembly models are inherent problems in this type of model.

This is clearly visible from the assembly shown in figure 3-center. Here, coupling faces F_1 and F_2 represent the same geometric feature; however, they are represented separately and maintained in two different parts. Such separations are not only unnecessary expense of memory, but also makes the model prone to errors for certain operations. For example, after a local translation of the face F_1 or F_2 , the material composition of a point in a neighborhood of F_1 or F_2 could not be assessed unambiguously, since the point can be classified randomly as within a (both) component(s) due to calculation errors. More recent cases can be seen in (Wang, Yu, Zhou, & Guo, 2011), (d'Otreppe, Boman, & Ponhot, 2012), Ohtake (Ohtake Y. a., 2013).

Cell models

Unlike assembly representations, cell models use non-manifold cell representations for modeling space partitions. The geometry is modeled essentially with non-manifold boundary representations. In figure 3-right, the non-manifold conditions occurring around the edge (border) AB , because the neighborhood of a point on the border AB is not homeomorphic to a disk in two dimensions (Weiler, 1988), whereas for an assembly model all components are topologically manifold.

According to Bidarra (Bidarra, de Kraker, & Bronsvort, 1998) in a cell model data redundancy can be kept to a minimum through a mechanism of co-boundary. In the cell representation a topological element (for example, a face) differs from the reference sides. For example, the use of a face is actually the use of one of the two sides of the face, and each side is oriented with respect to the same geometry of the face. Either of the two side of the face that share the same border element are called co-boundary.

With a cell model, for the same example shown in figure 3-left, the boundary face is not shown separately as the case shown in figure 3-center, instead, it is represented with a single face F , as shown in figure 3-right. Here F_1 and F_2 are oriented instances (sides) of the face F . Again, when the boundary face is subject to the same local translation as discussed above, the changes will be applied to the geometries of the face F , which is shared by F_1

and F2. Therefore, consistent changes are simultaneously applied to both sides of the face (that is, F1 and F2). Thus, one can obtain the point classification and can achieve a robust assessment of the material composition.

METODOLOGY

There are two techniques used to generate an image-based model (Moustakides, Briassoulis, Psarakis, & Dimas, 2000): The first approach builds the surface from the point cloud data, using reverse engineering methods or a commercially available reverse engineering software package. A 3D voxel model generated from segmented image slices can be used to create a point cloud data which is then triangulated to form a faceted model (Starly, y otros, 2004). An alternative method is to reconstruct a surface from serial parallel contours extracted from sequential medical images. These images are segmented into ROI and edge points around the boundary are extracted and ordered (Knopf & Al-Naji, 2001). The accuracy of the fitted surface model depends largely on the extracted edge points and the function uses to fit curves to those contours.

In this work, a method based on indicator functions for converting three dimensional labeled images into compact implicit functions is proposed according to the first approach presented in (Moustakides, Briassoulis, Psarakis, & Dimas, 2000), (see figure 4). As part of the method, each label is associated with a specific object (organ) of interest (see figure 5).

First, a segmented medical image is considered as input data from which a point cloud P is extracted for each object of interest (see figure 5). Secondly, an implicit surface S representing a smooth continuous three-dimensional scalar field for a specific region is reconstructed by defining an indicator function from the point cloud P , using the Poisson reconstruction method (Kazhdan, Bolitho, & Hoppe, 2006). Then, the region's surface $S = \delta_\Omega$ is represented by the zero level-set of a function $f(x) = 0$, which completely replaces the original labeled region during the meshing operations. Figure 5 depicts the pipeline for the proposal work-flow.

Input data

The effectiveness of a modeling method is dependent on the data set to which it is applied. One

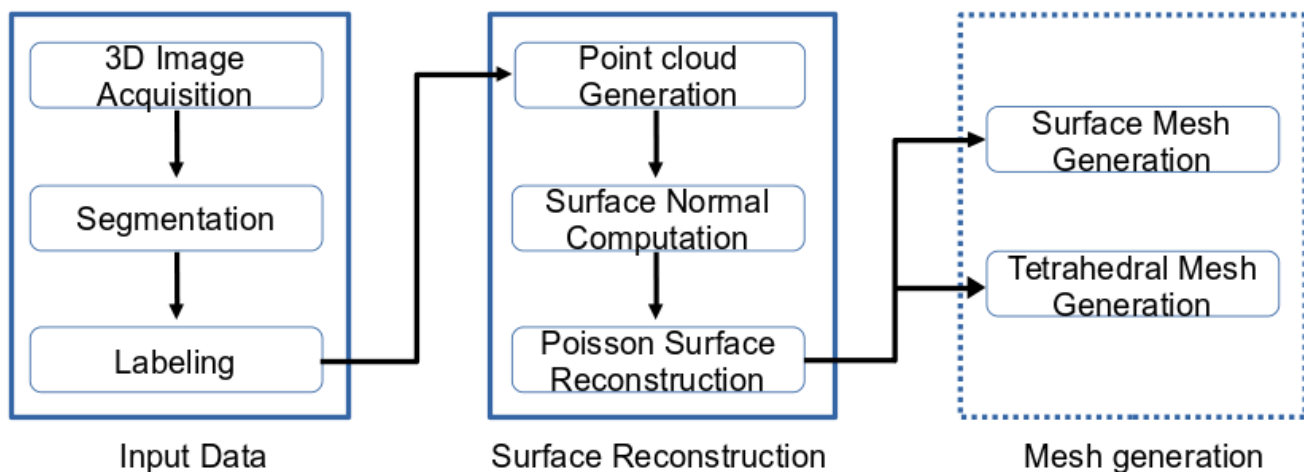


Figure 4. Workflow for converting 3d labeled images into compact implicit functions

Source: own work

modeling method may be particularly effective for one type of data set, while being entirely useless for many others. When creating a computer model of a real-world object, the first task is to measure the relevant properties of the object. Additionally, in order to successfully build a solid model of heterogeneous objects, it is important to accurately identify and extract features of interest from this raw data (See figure 5).

Although medical image segmentation is an established and mature field, fully automatic segmentation of medical image data remains an unsolved problem (De Santis, Ambrosio, Mollica, Netti, & Nicolais, 2007). Segmenting medical data remains a challenging task due to the size of the raw data, the complexity of anatomical shapes, overlap of gray level values between neighboring tissues and organs, lack of consistently distinct boundaries and sampling artifacts and noise (Caon, 2004). Due to the above, a previously segmented medical image

is considered as input data to work with. Hence, the quality of the resulting model will depend on the quality of the set of segmented images.

Surface reconstruction

Although the main requirement of all surface reconstruction methods is a set of three-dimensional points that sample the surface, working with the points alone may fail to provide an accurate surface reconstruction. To address this issue, we assume a set of normal vectors \mathbf{N} along with the point cloud \mathbf{P} . In other words, for each $p_i \in P$ there is an accompanying normal $\mathbf{n}_i \in \mathbf{N}$. In the field of Computer graphics the set of points \mathbf{P} is usually obtained by laser range-finders, mechanical touch probes and computer vision techniques such as depth from stereo (Ohtake, Belyaev, Alexa, Turk, & Seidel, 2005). As in our case, the input data is a 3D segmented image (see previous subsection "Input

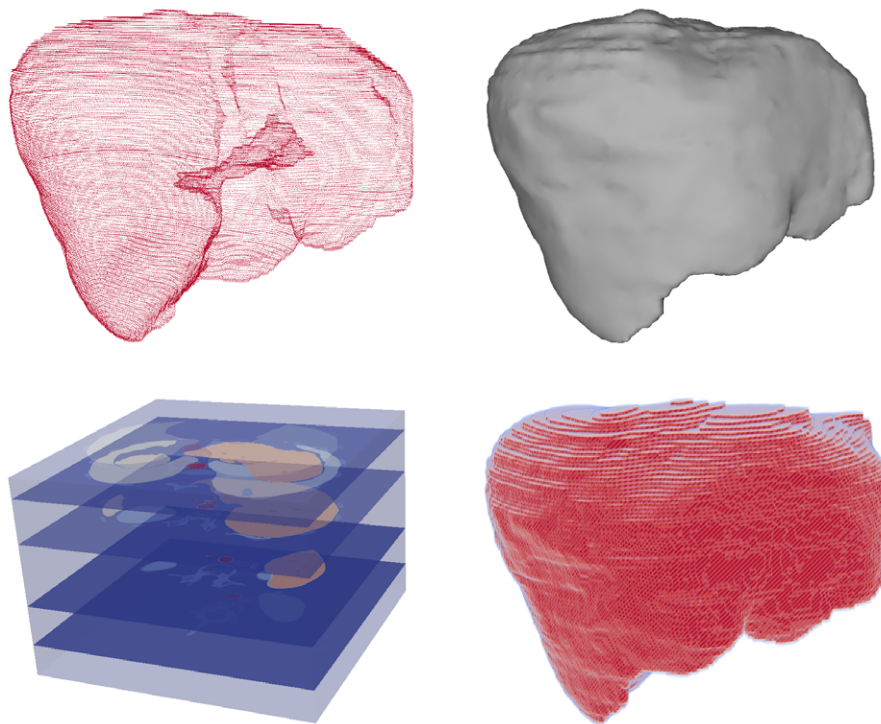


Figure 5. The pipeline for the proposed method.

Source: own work

data"); a procedure that automatically extracts the boundary points and surface normals from this image has been developed (Gómez-Mora & Flórez-Valencia, 2015).

Based on the observation that segmented data consists of one value for points inside the object and a second value for points outside the object, the inward pointing normal field of the boundary of a solid can be interpreted as the gradient of the solid's indicator function χ_Ω , which is often defined to have value 1 inside and value 0 outside the model, the iso-surface induced by the indicator function defines the reconstructed model δ_Ω .

Assuming a point cloud with oriented normals, an indicator function x can be found by ensuring its gradient as-close-as-possible to the normal field \mathbf{N} in terms of least-squares using $\|\nabla_x - \mathbf{N}\|_2^2$. If we apply the divergence operator to this problem, then this amounts to solving the following Poisson equation:

$$\nabla \cdot \nabla \chi = \Delta \chi = \nabla \cdot \mathbf{N} \quad (6)$$

Thus, given a vector field $V: R^3$, defined by the point cloud \mathbf{P} , the goal is to solve the scalar function $\chi: R^3 \rightarrow R$ minimizing:

$$E(\chi) = \int \|\nabla \chi(\mathbf{p}) - V(\mathbf{p})\|^2 d\mathbf{p} \quad (7)$$

Kazhdan (Kazhdan, Bolitho, & Hoppe, 2006) directly solves for x in the spatial domain via a

multi-grid approach, hierarchically solving for x in a coarse-to-fine resolution manner. This method is called Poisson surface reconstruction (PSR) and uses the Euler-Lagrange formulation, where the minimum is obtained by solving the Poisson equation:

$$\Delta \chi = \nabla \cdot \nabla \chi = \nabla \cdot V \quad (8)$$

Solving the Poisson equation, the function x is obtained that approximates the indicator function. The surface \mathbf{S} is then represented by the zero crossing of the indicator function (see figure 5-left-button, and figure 6), or with a suitable isovalue, typically the average or median value of x evaluated at all of the input points.

Mesh generation

The meshing algorithm requires to know the surface to be meshed, in this case, the implicit surfaces described as the zero level set of the indicator function. These meshes are either surface meshes approximating the boundaries of anatomical structures or volume meshes of these objects. Basically the algorithm computes a set of sample points on the surface, and extract an interpolating surface mesh from the three dimensional triangulation of these sample points. Points are iteratively added to the sample, as in a Delaunay refinement process,

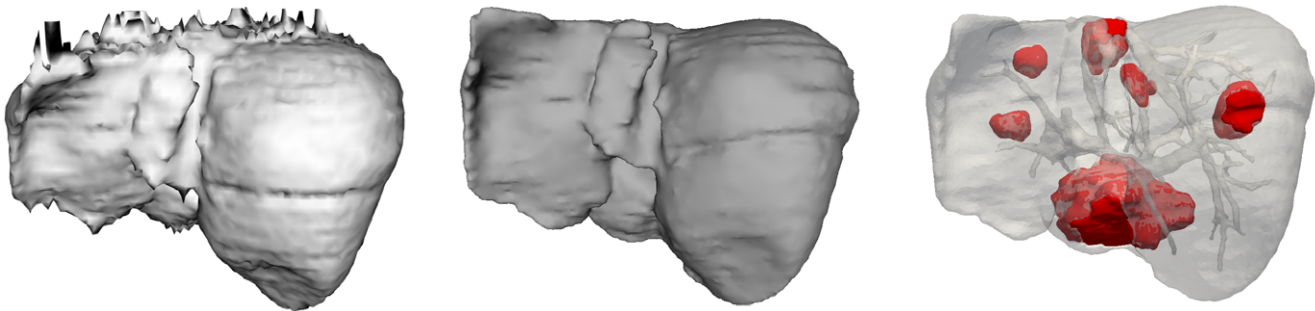


Figure 6. Surface reconstruction outputs from a segmented image using our method.

Source: own work

until some size and shape criteria on the elements of the surface mesh are satisfied (Alliez, 2015).

In (Alliez, 2015) has been clarified that if the surface is smooth enough, and if the size criteria are small enough, the algorithm guarantees that the output mesh is homeomorphic to the surface, and is within a small bounded distance from the surface. The algorithm can also be used for non-smooth surfaces but then there is no guarantee.

For simulation purposes one of the most important quality metrics for surface meshes is the minimal angle that avoids having flat triangles. In our experiments both the surface meshes and the volumetric meshes were constrained to have triangles with minimum angle above 30 degrees as shown in figure 7.

Figure 7-left shows surface meshes fitting the implicit surfaces of the left kidney, and two tumors

located inside the liver. In figure 7-center a cut of the liver's volume mesh with two tumors is depicted, while in figure 7-right the volume meshes of the tumors are added to the scene, and a superposition of volumetric meshes is rendered to show the position of the tumors in figure 7-center.

RESULTS

Representing multi-material interfaces begins with the generation of the indicator functions χ_i that characterize each material in the volume. We do this by first isolating each material label into a separate volume, extracting boundary points and then constructing smooth implicit representations of the point clouds (see figure 8).

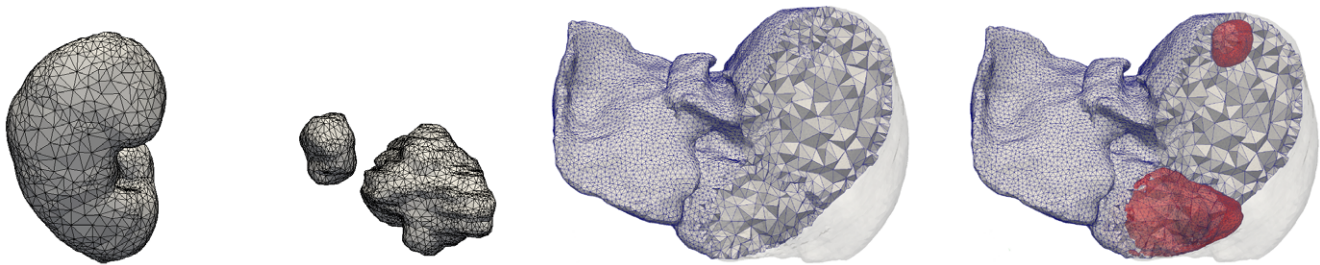


Figure 7. Mesh generation from a vector of implicit surfaces.

Source: own work

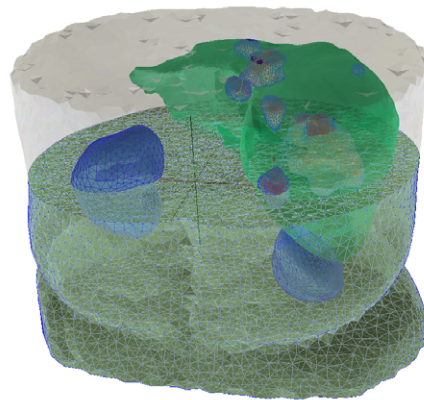


Figure 8. Volume mesh using our method, generated from a vector of implicit functions.

Source: own work

To establish our method's ability to handle complex geometries, we consider the reconstruction of nine different biological structures provided by IRCAD (IRCAD, 2015): a liver, the two kidney and six liver tumors, all acquired using a CT scan. The patient icom image was acquired using a CT scan with dimensions: $512 \times 512 \times 129$; spacing: $x=0.57$, $y=0.57$, $z=1.6$; All the segmented structures (liver, kidneys, and tumors) have the same dimensions as the original patient dicom image, i.e., 33816576 points that are equivalent to 33 MB (see Fig 5).

We use a VTK (Schroeder, Martin, & Lorensen, 2006) implementation of the MC algorithm proposed by Lorensen and Cline (Lorensen & Cline, 1987) to obtain the different point-clouds P_i . All tests were executed on a PC with an Intel R Core i7-4790 processor and 16GB of RAM. The Poisson surface reconstruction method is computed using as solver the Eigen3, version 3.2.0. The surface meshing, and volume meshing are computed using the CGAL library (Fabri, Giezeman, Kettner, Schirra, & Schoneherr, 1998) (see figure 7 and figure 8).

CONCLUSIONS

Recently, modeling heterogeneous objects with intricate geometries as well as complex material distribution has attracted enormous attentions (Yuan, Yu, & Wang, 2012), Ohtake (Ohtake Y. a., 2013). This type of modeling has been considered as a hybrid type of modeling where the geometric modeling and material modeling are included (Chiu & Tan, 2000), (Siu & Tan, 2002). In this work, we have restricted our interest to the geometrical representation of heterogeneous objects as the basis for the modeling of materials and properties of the objects as it was described by Kumar (Kumar, et al., 1999). This geometric model can be used in further modeling stages where each homogeneous material component is surrounded by an implicit boundary surface.

In this paper, we have shown that an implicit representation defined in terms of indicator functions is a viable tool for solid modeling of

heterogeneous objects when segmented medical images are available. Planned future work includes making a theoretical model for the creation, manipulation and querying of heterogeneous objects with the purposes of surgical planning and simulations. Additionally, we have already begun to investigate a number of ways to improve the method and procedures presented herein, as well as to explore new applications and algorithms based on a multi-material implicit representation.

FINANCING

This work was partially supported by the Universidad Distrital "Francisco José de Caldas" of Bogotá under Grant No. 345 of April 15, 2010.

REFERENCIAS

- Alliez, P., & others. (June de 2015). *3D Mesh Generation*.
- Bajaj, C. (1997). *Introduction to implicit surfaces*. Morgan Kaufmann.
- Bidarra, R., de Kraker, K. J., & Bronsvort, W. F. (1998). Representation and management of feature information in a cellular model. *Computer-Aided Design*, 30(4), 301-313.
- Caon, M. (2004). Voxel-based computational models of real human anatomy: a review. *Radiation and environmental biophysics*, 42(4), 229-235.
- Carr, J. C., Beatson, R. K., Cherrie, J. B., Mitchell, T. J., Fright, W. R., McCallum, B. C., & Evans, T. R. (2001). Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions. *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, (págs. 67-76).
- Chen, K.-Z., & Feng, X.-A. (2004). CAD modeling for the components made of multi heterogeneous materials and smart materials. *Computer-Aided Design*, 36(1), 51-63.
- Cheng, J., & Lin, F. (2005). Approach of heterogeneous bio-modeling based on material features. *Computer-Aided Design*, 37(11), 1115-1126.
- Chiu, W., & Tan, S. (2000). Multiple material objects: from CAD representation to data format for

- rapid prototyping. *Computer-aided design*, 32(12), 707-717.
- De Santis, R., Ambrosio, L., Mollica, F., Netti, P., & Nicolais, L. (2007). Mechanical properties of human mineralized connective tissues. En *Modeling of Biological Materials* (págs. 211-261). Springer.
- d'Otreppe, V., Boman, R., & Ponthot, J.-P. (2012). Generating smooth surface meshes from multi-region medical images. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 28(6-7), 642-660.
- Fabri, A., Giezeman, G.-J., Kettner, L., Schirra, S., & Schonherr, S. (1998). On the design of CGAL, the computational geometry algorithms library.
- Gómez-Mora, M., & Flórez-Valencia, L. (2013). Three-dimensional object reconstruction. *Vínculos*.
- Gómez-Mora, M., & Flórez-Valencia, L. (2015). Surface reconstruction from three dimensional segmented domains using implicit functions. *IEEE*.
- Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J., & Stuetzle, W. (1992). *Surface reconstruction from unorganized points* (Vol. 26). ACM.
- IRCAD. (April de 2015). <http://www.ircad.fr/research/3d-ircadb-01/>. <http://www.ircad.fr/research/3d-ircadb-01/>.
- Kazhdan, M., Bolitho, M., & Hoppe, H. (2006). Poisson surface reconstruction. *Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing*, 7.
- Knopf, G. K., & Al-Naji, R. (2001). Adaptive reconstruction of bone geometry from serial cross-sections. *Artificial Intelligence in Engineering*, 15(3), 227-239.
- Kou, X. Y. (2007). Heterogeneous object modeling: A review. 284-301.
- Kou, X., Tan, S., & Sze, W. (2006). Modeling complex heterogeneous objects with non-manifold heterogeneous cells. *Computer-Aided Design*, 38(5), 457-474.
- Kumar, V. a. (1997). An approach to modeling multi-material objects. *Proceedings of the fourth ACM symposium on Solid modeling and applications*, 336—345.
- Kumar, V., Burns, D., Dutta, D., & Hoffmann, C. (1999). A framework for object modeling. *Computer-Aided Design*, 31(9), 541-556.
- Liu, H., Maekawa, T., Patrikalakis, N., Sachs, E., & Cho, W. (2004). Methods for feature-based design of heterogeneous solids. *Computer-Aided Design*, 36(12), 1141-1159.
- Lorensen, W. E., & Cline, H. E. (1987). Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *ACM siggraph computer graphics*, 21, págs. 163-169.
- Moustakides, G., Briassoulis, D., Psarakis, E., & Dimas, E. (2000). 3D image acquisition and NURBS based geometry modelling of natural objects. *Advances in Engineering Software*, 31(12), 955-969.
- Ohtake, Y. a. (2013). Edge detection based multi-material interface extraction on industrial CT volumes. *Science China Information Sciences*, 1—9.
- Ohtake, Y., Belyaev, A., Alexa, M., Turk, G., & Seidel, H.-P. (2005). Multi-level partition of unity implicits. *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, (pág. 173).
- Qian, X., & Dutta, D. (2003). Design of heterogeneous turbine blade. *Computer-Aided Design*, 35(3), 319-329.
- Schroeder, W., Martin, K., & Lorensen, B. (2006). *Visualization Toolkit: An Object-Oriented Approach To 3D Graphics* (4th ed.).
- Shin, K.-H., & Dutta, D. (2001). Constructive representation of heterogeneous objects. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 1(3), 205-217.
- Siu, Y., & Tan, S. (2002). Source-based heterogeneous solid modeling. *Computer-Aided Design*, 34(1), 41-55.
- Starly, B., Darling, A., Gomez, C., Nam, J., Sun, W., Shokoufandeh, A., & Regli, W. (2004). Image based bio-cad modeling and its applications to biomedical and tissue engineering. *Proceedings of the ninth ACM symposium on Solid modeling and applications*, (págs. 273-278).
- Sun, W. a. (2002). Reasoning Boolean operation based modeling for heterogeneous objects. *Computer-Aided Design*, 481—488.

- Sun, W., Darling, A., Starly, B., & Nam, J. (2004). Computer-aided tissue engineering: overview, scope and challenges. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 39(1), 29-47.
- Sun, W., Starly, B., Nam, J., & Darling, A. (2005). BioCAD modeling and its applications in computer-aided tissue engineering. *Computer-Aided Design*, 37(11), 1097-1114.
- Van Dam, A., Feiner, S. K., McGuire, M., & Sklar, D. F. (2013). *Computer graphics: principles and practice*. Pearson Education.
- Wang, C. C. (2007). Direct Extraction of Surface Meshes from Implicitly Represented Heterogeneous Volumes. *Comput. Aided Des.*, 35-50.
- Wang, L., Yu, Y., Zhou, K., & Guo, B. (2011). Multiscale vector volumes. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 30(6), 167.
- Wang, M. Y., & Wang, X. (2005). A level-set based variational method for design and optimization of heterogeneous objects. *Computer-Aided Design*, 37(3), 321-337.
- Weiler, K. (1988). The radial edge structure: a topological representation for non-manifold geometric boundary modeling. *Geometric modeling for CAD applications, 1988*, 3-36.
- Yuan, Z., Yu, Y., & Wang, W. (2012). Object-space multi-phase implicit functions. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 31(4), 114.
- Zaidi, H., & Tsui, B. M. (2009). Review of computational anthropomorphic anatomical and physiological models. *Proceedings of the IEEE*, 97(12), 1938-1953.





Collective Multi-Agent Navigation Model Based on Bacterial Quorum Sensing

Modelo de navegación colectiva multi-agente basado en el Quorum Sensing bacterial

Edwar Jacinto Gómez¹, Mauricio Giral², Fredy Hernán Martínez Sarmiento

Fecha de recepción: 14 octubre de 2014

Fecha de aceptación: 18 de septiembre de 2015

Cómo citar: Jacinto, E., Giral, M., & Martínez, F. (2016). Collective multi-agent navigation model based on bacterial Quorum Sensing. *Revista Tecnura*, 20(47), 29-38. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a02

Abstract

We present a model for the study, analysis, design and evaluation of collective multi-agent navigation for autonomous robots based on behaviors observed in bacteria. The system consists of a set of simple agents (artificial bacteria), which through readings and local interaction are self-organized to navigate along the environment. Given the parallel structure, also happens to be a very robust solution. We show the basic structure proposal for the design abstracting the characteristics of the biological model, together with an analysis of stability and convergence.

Keywords: collective navigation, intensity gradient, quorum sensing

Resumen

Se presenta un modelo para el estudio, análisis, diseño y evaluación de navegación colectiva multi-agente para robots autónomos basado en comportamientos observados en bacterias. El sistema consiste de un conjunto de agentes sencillos (bacterias artificiales), los cuales a través de lecturas e interacciones locales se auto-organizan para navegar a lo largo del ambiente. Dada la estructura paralela, también resulta ser una solución muy robusta. Se muestra la estructura básica propuesta para el diseño abstrayendo las características del modelo biológico, en conjunto con un análisis de estabilidad y convergencia.

Palabras clave: navegación colectiva, gradiente de intensidad, quorum sensing

¹ Electronic Control and Instrumentation Engineer, Sciences of the Information and Communications Master, Professor at the District University Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contact: ejacintog@udistrital.edu.co

² Electronic Control and Instrumentation Engineer, Bioengineering Specialist, Electronic Engineer Student Master University Santo Tomas, Bogotá D.C., Colombia. Contact: wimagira@gmail.com

³ Electrical Engineer, Engineering Project Management Specialist, Systems and Computer Engineering Ph.D.(c), Professor at the District University Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contact: fmartinezs@udistrital.edu.co

INTRODUCTION

The problem of finding a robotic navigation path refers to make an agent (an object with physical dimensions) to move from one point (current configuration) to another point (desired configuration) in a navigation environment, avoiding obstacles with a minimum margin. This is currently an unsolved problem in robotics, and in fact, one of the most active fields worldwide.

The exact definition of a path for a real application is a computationally intractable problem (Idsardi, 2006). It is possible to significantly simplify the problem using geometric algorithms on the environment, such is the case of Voronoi diagrams (Xia y Xiangmin, 2014), (Kuo-Ho, Tan-Phat, Chan-Yun, y Wen-June, 2014), (Wei-Che, Chan-Yun, Kuo-Ho, y Yi-Hong, 2014), (Unghui, Sangyol, HyunChul, Vasseur, y Demonceaux, 2014), the A* search algorithm (Haifeng, Jiawei, Guifeng, y Yun, 2014), and in general, cells space decomposition algorithms (Holman, Jacinto, y Martínez, 2015), (Jan, Chi-Chia, Wei, y Ting-Hsiang, 2014), (Goyal y Nagla, 2014), (Delgado, Casallas, y Jacinto, 2014). However, these strategies can only produce useful results in real applications when the navigation environment is static, that is, it remains unchanged over a considerable period of time. This condition, in particular, is not satisfied where there are more than one agent.

Some more efficient algorithms as potential fields have serious problems of convergence and local minima (Amorim y Ventura, 2014), (Mohammedi, Rahimi, y Suratgar, 2014), (Li y Wei, 2014), which it is a big issue in a real application. One of the most efficient and robust strategies today to real problems of navigation in dynamic environments are algorithms based on local readings, formally known as *Sampling Based Algorithms* SBA (Van-Dung, Dongwook, Kurnianggoro, y Kang-Hyun, 2014), (Lianhang et al., 2014), (Narayanan, Vernaza, Likhachev, y LaValle, 2013). In contrast to the above mentioned methods, in which an explicit representation of the obstacles is performed

in the configuration space (a configuration that describes the position of the robot, and the configuration space C , in the set of all possible configurations (LaValle, 2006)), representation that is used to build the solution, and hence the high computational cost, in the SBA it is primarily relies on a local sensing hardware aboard the agent, which provides information on possible navigation paths. This allows working with minimum and sufficient information to define the robot motion, reducing the computational load, while answers in real time allowing changes in the environment.

Under the SBA scheme, collecting and processing information is essential to the process of mapping the environment, location in the environment and path planning. The current configuration is estimated at the stage of location by sensing the configuration space (C -space), and scheduler allows to define the desired final configuration. By its nature, the sensing process is itself a random approach which has advantages in terms of being able to provide quick solutions to complex problems, but it has the disadvantage that such solutions are often suboptimal. There is no guarantee of finding an optimal navigation solution (in those cases that this exists), SBA algorithms are able to provide a solution, if there is a solution to the problem, provided there is sufficient time for the development of the algorithm (are unbounded in time). Therefore, these schemes guarantee its success (completeness) under the concept of *probabilistic completeness* (it is not possible to define explicitly the time required to find the solution, but if there is a solution, the algorithm will find it).

We propose a scheme of collective bio-inspired navigation based on self-organization. Self-organization has been the subject of great theoretical research, however, its practical application in solving actual problems on the contrary has not been very noticeable, or with impact (Prokopenko, 2008). Some attempts that have been documented in this respect are the works of Mange (Mange et al., 1996), (Freitas y Gilbreath, 1980), where they document some developments on FPGAs in

bio-inspired hardware that somehow involve cellular reconstruction models, replicating them to build robust applications, systems resilience to physical damage. Such developments involve two importances biological processes at the cellular level: replication and regeneration. These two processes are crucial in any bio-inspired model that tries to replicate structures at the cellular level, such as the bacterial Quorum Sensing (QS), biological model used as reference in this research.

This paper is supported on various works related to research focused on growth and development of bacteria, both from the biological point of view and the point of view of engineering (Karafyllidis, 2011), (Wiedermann, 2011), (Besozzi, Cazzaniga, Mauri, y Pescini, 2011), (Shen y Zhou, 2010), (Niu, Fan, Tan, Rao, y Li, 2010), (Taylor, Tinsley, Wang, Huang, y Showalter, 2009). From the latter field, a lot of research is seen in search and optimization processes, specifically in computational intelligence, where the growth, development and interaction between bacteria offers interesting behavioral models (Zang, He, y Ye, 2010), (Cho y Kim, 2011), (Gómez y Rodríguez, 2011), (Goni, Redondo, Arroyo, y Castellanos, 2011), (Connelly y McKinley, 2011). In particular, it comes to have a structure capable of modeling individuals, groups of individuals, and their communication processes (Martínez y Delgado, 2010).

The paper is organized as follows. In Section 2 problem formulation is discussed, Section 3 describes the control strategy. Finally, conclusion and discussion are presented in Section 4.

PROBLEM FORMULATION

Let $W \subset \mathbb{R}^2$ be the closure of a contractible open set in the plane that has a connected open interior with obstacles that represent inaccessible regions (Gonzalez, Ghaffarkhah, y Mostofi, 2014). Let \mathcal{O} be a set of obstacles, in which each $O \subset \mathcal{O}$ is closed with a connected piecewise-analytic boundary that is finite in length. Furthermore, the obstacles in \mathcal{O} are pairwise-disjoint and countably finite in

number. Let $E \subset W$ be the free space in the environment, which is the open subset of W with the obstacles removed.

Let us assume a set of n agents in this free space. The agents know the environment E in which they move from observations, using sensors. These observations allow them to build an information space I . A information mapping is of the form of the equation (1).

$$q : E \rightarrow S \quad (1)$$

where S denote an *observation space*, constructed from sensor readings over time, i.e., through an observation history of the form of the equation (2).

$$\tilde{\sigma} : [0, t] \rightarrow S \quad (2)$$

The interpretation of this information space, i.e., $I \times S \rightarrow I$, is that which allows the agent to make decisions (LaValle, 2006).

We assume the agents are able to sense the proximity of their team-mates and/or obstacles within the environment, using minimal information. The environment E is unknown to the robot. Furthermore, the robot does not even know its own position and orientation. Our goal is to design the control rules for the n robots in order to independently solve navigation tasks in a dynamic and unknown environment.

The particular equations of motion $\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x})$ for each robot is unimportant in this approach. We do not explicitly control their motions and do not even attempt to measure their precise state. Instead, we rely on the fact that the robot moves in a uncontrollable way, but the trajectory satisfies the following high-level property: For any region $r \in \mathcal{R}$, it is assumed that the robot moves on a trajectory that causes it to strike every open interval in ∂r (the boundary of r) infinitely often, with non-zero, non-tangential velocities.

However, the robots should not move randomly in the environment, they should jointly develop a

task. To achieve this, we propose a design model based on the collective behavior of robots. This collective behavior involves a local interaction at agent level, reflecting a system-level behavior. These behaviors in conjunction with some control modes encoded in all agents, enable the coordinated navigation of the robots.

We develop an event-based system. Each robot starts with an initial control mode. During execution, the control mode may change only when receiving an sensor observation event y . Let Y denote the set of all possible observation events for a robot in a particular system, then $y \in Y$. The control modes of robot i are set during execution according to a policy. Since state feedback is not possible, *information feedback* is instead used. A *control policy* is specified as an information-feedback mapping which enables the control mode to be set according to the sensor observation history.

METHODOLOGY

The multi-agent model proposed is composed of a set of artificial bacteria or agents. This set of agents, and their interactions, reflect the dynamics that will navigate. All agents are identical in design. Nevertheless, to solve tasks, each of them undergoes certain behavior inside the system along the time.

The variables of this system are defined in a continuous space. However, the different agent behaviors are triggered by certain events (event-based), which implies that the appropriate analysis model is a hybrid system (the dynamic changes from one state to another when a condition is present).

Multi-agent dynamic system

The multi-agent model adopted for collective path planning is composed of a set of artificial bacteria or agents. This set of agents, and their interactions, reflect the navigation dynamics. All agents are identical in design. Nevertheless, each of them undergoes certain behavior inside the system along the time.

The variables of this system are defined in a continuous space. However, the different agent behaviors are triggered by certain events (event-based), which implies that the appropriate analysis model is a hybrid system (the dynamic changes from one state to another when a condition is present).

The simplified model of bacterial QS describes a set of independent cells, which under the generation of extra-cellular signals produce coordinated social behaviors (Otero, Munoz, Bernández, y Fábregas, 2004). The pathogenic bacteria that carry multicellular organisms are not virulent until they reach a sufficient majority to enforce a massive attack against the immune system. When bacteria determine that their population size is enough to trigger an attack, they transform and become virulent.

Definition 1. A bacterium is a pair (equation (3)).

$$V = (f, p) \quad (3)$$

where f is a nonnegative integer ($f \in \mathbb{Z}^+$) that indicates the amount of neighboring bacteria in direct contact, and p is a point in q -dimensional space ($p \in \mathbb{R}^q$) (Martínez S. y Delgado, 2010).

The bacterial recognition occurs in a bacterium V_i when the bacterium defines its values f and p . This definition corresponds to an extension of the cell definition in the antibody-antigen mathematical model (Tarakanov y Dasgupta, 2000).

Definition 2. The population density is evaluated using the distance between bacteria (equation (4)).

$$d_{ij} = d(V_i, V_j) \quad (4)$$

as the distance between bacteria V_i and V_j , which is calculated by any appropriate norm.

Definition 3. A bacterial population is defined as a nonempty set of bacteria (equation (5)).

$$W_0 = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_m\} \quad (5)$$

with non-zero distance among bacteria (equation (6)).

$$d_{ij} \neq 0, \quad \forall i, j, \quad i \neq j \quad (6)$$

The bacteria that implement the navigation task are called here Application Bacteria, AB, and are a subset of the bacterial population (figure 1).

$$W \subseteq W_0 \quad (7)$$

That is, W_0 is the set of all bacteria in the system, and W is the set of virulent bacteria in the system.

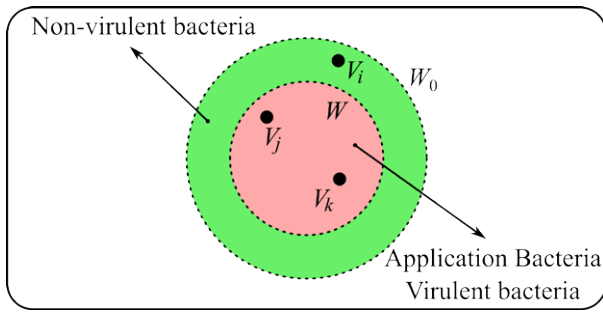


Figure 1. Bacterial population and application bacteria in the proposed system.

Source: Own work

Definition 4. The neighborhood threshold h , indicates the maximum amount of direct neighboring bacteria that a cell can have.

$$d_{ik} < d_{ij}, \quad \forall V_j \in W, k \neq j \quad \text{and} \quad d_{kj} < h, \quad \forall V_j \in W, k \neq j \quad (9)$$

and the number of bacteria in W is less than T , then V_i must be added to AB (the bacterium becomes virulent).

In other words, if the AB is very small and the non-virulent bacterium V_i is the nearest to a virulent bacterium, then V_i must become virulent (must solve the task with the other bacteria of AB).

Throughout reproduction, the population size (number of agents) is always compared to T , the quorum threshold, it is the parameter defining whether or not it has reached the quorum. Regarding the physical dimensions of the bacterial population, the density threshold h indicates the minimum distance needed between bacteria; in other words, the minimum distance that must exist between any pair of bacteria.

The behaviors of bacteria (self-organization) are coordinated by the following rules (the model does not include cell death):

Reproduction Rule: If the bacterium $V_i \in W_0 \setminus W$ can reproduce (equation (8)).

$$f_i < \eta \quad \text{and} \quad d_{ij} < h, \quad \forall V_j \in W \quad (8)$$

then V_i must reproduce by duplicating their DNA (code) in the available medium.

In other words, if the bacterial population is very small and the non-virulent bacterium V_i can reproduce, then V_i must reproduce (must copy its code to a neighboring inactive).

Virulence, Activation or Cell Differentiation Rule: If the bacterium $V_k \in W$ is the nearest to the bacterium $V_i \in W_0 \setminus W$ among all AB (figure 1).

Stability, convergence and parameters selection

The stability and convergence of the model is dependent on the parameters selected for the design of the navigation environment. Because the schema is supported in local readings, its use in real applications requires modification (design) of the

navigation environment. The parameters selection is essential for this design and modification of the environment.

The design of the navigation environment consists of defining the areas of E to be the final destination for the agents, and then place in them and in their neighborhoods, special marks (landmarks) that indicate this condition. Generally these landmarks are not equal, each value indicates the intensity corresponding to its position in E . The intensity value is designed for the entire navigation environment, so it grows near the final destination area.

Thus, during the search process (navigation), agents interpret local readings and determine the intensity value at each point of the environment. Climbing the slope of these values, each agent follows a heuristic that allows it to choose the optimal choice in each advance as does a greedy algorithm. Although such an approach can be inappropriate for some computational tasks (the strategy stagnates in local solutions without finding the global optimal solution), for the proposed algorithm based on QS this constitutes an exploration strategy that ultimately ensures convergence in the global optimal solution.

The effect of QS on the population is to accelerate the convergence in the areas of high performance. For this, the model takes into account the population size in the area, increasing the attraction when a threshold is exceeded. The value of the slope is designed as a function of the density threshold.

The following sections will show how to model the navigation field intensity as a gradient on the environment. This section focuses only in the vicinity of an area of high performance (area to be interpreted by the agents as of interest), and how to design a simple intensity field according to a slope, considering the issues of convergence.

The gradient in the area can be modeled by a system of two autonomous first-order ODEs (Ordinary Differential Equations), model in which the slope at each point represents the intensity of the

gradient. To plot the slope field, the two autonomous ODEs must be written in the form (equation (10)).

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \mathbf{G}(x, y) \\ \frac{dy}{dt} &= \mathbf{F}(x, y)\end{aligned}\quad (10)$$

That is, the first expression is the derivative of the variable represented on the horizontal axis of the environment, and the second expression is the derivative of the variable represented on the vertical axis of the environment. The origin corresponds to the center of the area of high performance.

The two functions must confine the agents at the origin. Since the slope of the two curves are who push the agents, it is possible to think of a curve design for x and y as shown in figure 2.

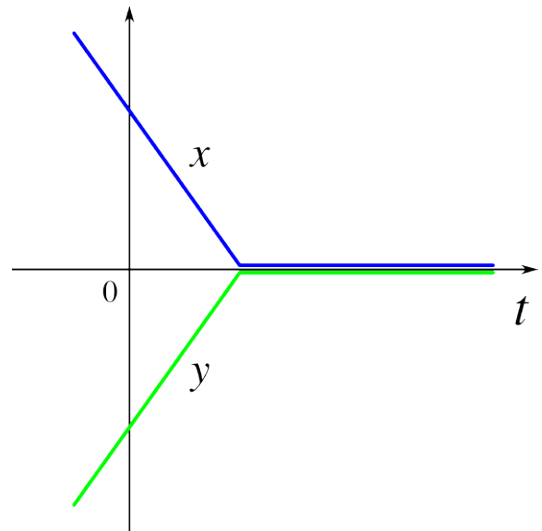


Figure 2. Linear approximation of intensity gradient behavior in an area of high performance.

Source: own work

These two curves are designed in such a way that with their growth there is no possibility of way between them. Curve y (green) is a reflection of the curve x (blue), and the slopes push towards the origin. To facilitate the calculation of derivatives, these curves can be replaced by exponential approximations (equation (11)).

$$x = a \times e^{\frac{-y}{\tau}} - a, \text{ and } y = a - a \times e^{\frac{-x}{\tau}} \quad (11)$$

In these two curves is easy to define the behavior: a is the reference value and τ is the time constant, which directly affects the slope of the curve, and can be defined as a function of the density threshold.

To represent graphically the slope field is necessary to calculate the derivatives of the curves (equation (12)).

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{a}{\tau \times e^{\frac{y}{\tau}}}, \text{ and } \frac{dy}{dt} = \frac{a}{\tau \times e^{\frac{x}{\tau}}} \quad (12)$$

Since these curves are exponential, we subtract to each one the value of the other variable to prevent grow up indefinitely (y to x and x to y). The figure 2 shows the slope field for a time constant of: $5\tau = 5 \Rightarrow \tau = 1$.

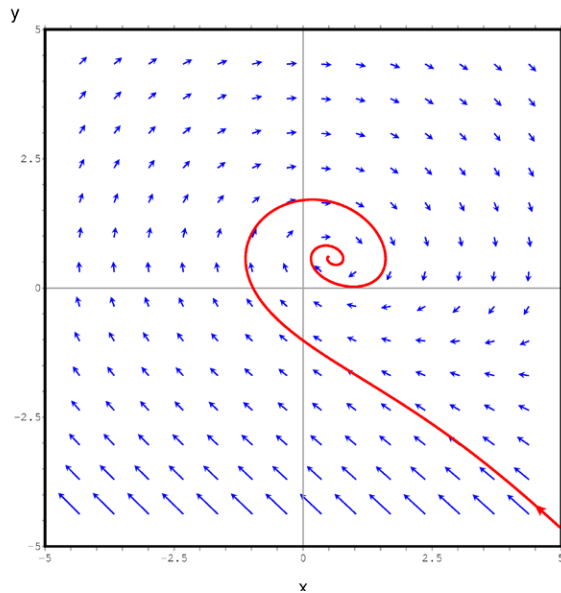


Figure 3. Designed slope field for an area of high performance.

Source: own work

The figure 4 shows the x and y curves for the resulting motion curve shown in figure 3 (red curve).

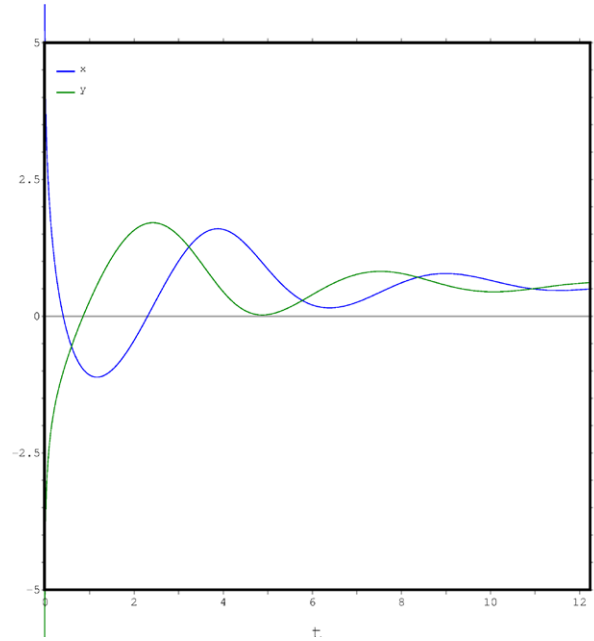


Figure 4. Exponential approximation of intensity gradient behavior in an area of high performance.

Source: own work

From the model and these behaviors is possible to conclude some general characteristics in terms of stability and convergence.

Lemma 1: Let $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ be a set of points drawn randomly in E on a two-dimensional Euclidean plane \mathbb{R}^2 , each with an associated slope value m according to some law of navigation. Let $\mathbf{G}(x,y)$ be a function on \mathbb{R}^2 that assigns a slope value to each point $p \in \mathbf{p}$, such that the maximum value is assigned to the central point of the area of high performance. Then there exists a point p_0 such that $\mathbf{G}(p_0) = m_0 \geq \mathbf{G}(p) \forall p \in \mathbf{p}$, where p_0 is the closest point to the center of the area of high performance.

Proof: By construction the maximum value of m is assigned to the central point of the area of high performance. If this construction is correct, p_0 always exists. p_0 is the $p \in \mathbf{p}$ closest point to the area of high performance. Furthermore, since the heuristic climbs always looking for the right next value, the agent eventually will find this point p_0 if there are no other areas of high performance.

Lemma 2: If there is at least one area solution in E , incorporation of QS in finding solutions does not produce stability problems in the search algorithm. By contrast, this reduces the convergence time.

Proof: The proposed algorithm based on QS alters the behavior of the function $\mathbf{G}(x,y)$ at points near to the high performance area. This alteration is conditioned to the density threshold, producing localized alterations if the population in the area exceeds that threshold. QS increases the weight of the solution, and therefore reducing the total search time. However, QS does not change the global behavior of $\mathbf{G}(x,y)$, therefore does not affect the convergence of the search.

CONCLUSIONS

In this paper we propose a model for collective multi-agent navigation that enables the analysis and design of navigation tasks for an autonomous group of robots. The model is inspired by bacterial interaction, and describes a simplified behavior of bacterial QS, which serves to define an artificial bacterium, its characteristics of interaction, and its basic navigation conditions. The structure assumed in the proposed model is hybrid, in which behaviors that can be analyzed continuously are triggered by events (local readings) characterizing discrete transition. Taking as a design strategy landmarks allocation based on density gradients, we demonstrated that the system is stable and converges to a solution if it exists. Thus, we show how a group of robots can be used to solve simple navigation tasks without requiring system identification, geometric map building, localization, or state estimation, using a simple minimalist design in hardware, software and algorithm operation. The interaction between the robots responds to the simplified algorithm of local communication, which guarantees a minimum sensing, what makes the strategy promissory for exploration in collapsed and unknown environments. The capabilities

and system functions can be scaled changing the number of robots.

FINANCING

This work was supported by the District University Francisco José de Caldas, in part through CIDC, and partly by the Technological Faculty. The views expressed in this paper are not necessarily endorsed by District University. The authors thank the research groups DIGITI and ARMOS for the evaluation carried out on prototypes of ideas and strategies.

REFERENCES

- Amorim, D., y Ventura, R. (2014). Towards efficient path planning of a mobile robot on rough terrain. En *2014 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)* (p. 22-27).
- Besozzi, D., Cazzaniga, P., Mauri, G., y Pescini, D. (2011). Biosimware: A software for the modeling, simulation and analysis of biological systems. En M. Gheorghe, T. Hinze, G. Paun, G. Rozenberg, y A. Salomaa (Eds.), *Membrane computing* (Vol. 6501, p. 119-143). Springer Berlin Heidelberg.
- Cho, J. H., y Kim, D. H. (2011). Intelligent feature selection by bacterial foraging algorithm and information theory. En *Advanced Communication and Networking* (Vol. 199, p. 238-244). Springer Berlin Heidelberg.
- Connelly, B., y McKinley, P. (2011). Evolving social behavior in adverse environments. En G. Kampis, I. Karsai, y E. Szathmáry (Eds.), *Advances in artificial life. darwin meets von neumann* (Vol. 5777, p. 490-498). Springer Berlin Heidelberg.
- Delgado, G. I., Casallas, R., y Jacinto, G. E. (2014). Path planning in static scenarios using image processing and cell decomposition. En *2014 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)* (p. 1-5).
- Freitas, R., y Gilbreath, W. (1980). Chapter 5: Replicating systems concepts: Self-replicating lunar factory

- and demonstration. En *Advanced automation for space missions, 1980 nasa/asee summer study*.
- Gómez, P., y Rodríguez, A. (2011). Simulating a rock-scissors-paper bacterial game with a discrete cellular automaton. En *New challenges on bioinspired applications* (Vol. 6687, p. 363-370). Springer Berlin Heidelberg.
- Goni, A., Redondo, M., Arroyo, F., y Castellanos, J. (2011). Biocircuit design through engineering bacterial logic gates. *Natural Computing*, 10, 119-127.
- Gonzalez, A., Ghaffarkhah, A., y Mostofi, Y. (2014). An integrated framework for obstacle mapping with see-through capabilities using laser and wireless channel measurements. *IEEE Sensors Journal*, 14(1), 25-38.
- Goyal, J., y Nagla, K. (2014). A new approach of path planning for mobile robots. En *2014 international conference on advances in computing, communications and informatics icacci* (p. 863-867).
- Haifeng, W., Jiawei, Z., Guifeng, Z., y Yun, L. (2014). Has: Hierarchical a-star algorithm for big map navigation in special areas. En *2014 5th international conference on digital home (icdh)* (p. 222-225).
- Holman, M., Jacinto, E., y Martínez, F. (2015). Generación de ruta óptima para robots móviles a partir de segmentación de imágenes. *Información Tecnológica*, 26(2), 145-152.
- Idsardi, W. (2006). A simple proof that optimality theory is computationally intractable. *Linguistic Inquiry*, 37(2), 271-275. (The MIT Press)
- Jan, G. E., Chi-Chia, S., Wei, C., y Ting-Hsiang, L. (2014). An shortest path algorithm based on Delaunay triangulation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(2), 660-666.
- Karafyllidis, I. G. (2011). Regulating the quorum sensing signalling circuit to control bacterial virulence: in silico analysis. *IET Systems Biology*, 5(2), 103-109.
- Kuo-Ho, T., Tan-Phat, P., Chan-Yun, Y., y Wen-June, W. (2014). Image-based smooth path planning for wheeled robot. En *11th IEEE international conference on control and automation (icca)* (p. 203-207).
- LaValle, S. M. (2006). *Planning algorithms* (1.a ed.). Cambridge University Press. Retrieved from <http://planning.cs.uiuc.edu/>
- Li, C., y Wei, L. (2014). Adaptive artificial potential field approach for obstacle avoidance path planning. En *2014 seventh international symposium on computational intelligence and design (iscid)* (Vol. 2, p. 429-432).
- Lianhang, S., Min, L., Yang, L., Qing-Ying, Z., Jie, L., y Zhongya, W. (2014). A novel artificial bee colony optimization algorithm for global path planning of multi-robot systems. En *2014 IEEE international conference on robotics and biomimetics (robio)* (p. 1186-1191).
- Mange, D., Goeke, M., Madon, D., Stauer, A., Tempesti, G., y Durand, S. (1996). Embryonics: A new family of coarse-grained field programmable gate array with self-repair and self-reproducing properties. *LNCS Towards Evolvable Hardware*, 1062, 197-220.
- Martínez S., F. H., y Delgado, J. (2010). Hardware emulation of bacterial quorum sensing. En D.-S. Huang, Z. Zhao, V. Bevilacqua, y J. Figueroa (Eds.), *Lecture notes in computer science 6215. advanced intelligent computing theories and applications* (Vol. 6215, p. 329-336). Springer Berlin Heidelberg.
- Martínez, F., y Delgado, J. (2010). Hardware emulation of bacterial quorum sensing. *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications, LNCS 6215*, 329-336.
- Mohammadi, A., Rahimi, M., y Suratgar, A. (2014). A new path planning and obstacle avoidance algorithm in dynamic environment. En *2014 22nd Iranian conference on electrical engineering (icee)* (p. 1301-1306).
- Narayanan, V., Vernaza, P., Likhachev, M., y LaValle, S. M. (2013). Planning under topological constraints using beam-graphs. En *2013 IEEE international conference on robotics and automation (icra)* (p. 431-437).
- Niu, B., Fan, Y., Tan, L., Rao, J., y Li, L. (2010). A review of bacterial foraging optimization part i: Background and development. En *Advanced intelligent computing theories and applications* (Vol. 93, p. 535-543). Springer Berlin Heidelberg.
- Otero, A. M., Munoz, A., Bernández, M. I., y Fábregas, J. (2004). *Quorum sensing el lenguaje de las*

- bacterias* (First Edition ed.). Spain: Acribia. (ISBN 9788420010465)
- Prokopenko, M. (2008). *Advances in applied self-organizing systems*. Springer Berlin Heidelberg.
- Shen, J., y Zhou, H. (2010). The dynamics of quorum sensing mediated by small rnas in vibrio harveyi. En *Life system modeling and intelligent computing* (Vol. 97, p. 177-184). Springer Berlin Heidelberg.
- Tarakanov, A. O., y Dasgupta, D. (2000, Feb.). A formal model of an artificial immune system. *Biosystems*, 55(3), 151-158. (ISSN 0303-2647)
- Taylor, A. F., Tinsley, M. R., Wang, F., Huang, Z., y Showalter, K. (2009). Dynamical quorum sensing and synchronization in large populations of chemical oscillators. *Science*, 323(5914), 614-617.
- Unghui, L., Sangyol, Y., HyunChul, S., Vasseur, P., y Demonceaux, C. (2014). Local path planning in a complex environment for self-driving car. En *2014 IEEE 4th annual international conference on cyber technology in automation, control, and intelligent systems (cyber)* (p. 445-450).
- Van-Dung, H., Dongwook, S., Kurnianggoro, L., y Kang-Hyun, J. (2014). Path planning and global trajectory tracking control assistance to autonomous vehicle. En *2014 11th international conference on ubiquitous robots and ambient intelligence (urai)* (p. 646-650).
- Wei-Che, Y., Chan-Yun, Y., Kuo-Ho, S., y Yi-Hong, T. (2014). Dynamic path planning under randomly distributed obstacle environment. En *2014 cacs international automatic control conference (cacs)* (p. 138-143).
- Wiedermann, J. (2011). Nanomachine computing by quorum sensing. En J. Kelemen y A. Kelemenova (Eds.), *Computation, cooperation, and life* (Vol. 6610, p. 203-215). Springer Berlin Heidelberg.
- Xia, C., y Xiangmin, C. (2014). The uav dynamic path planning algorithm research based on voronoi diagram. En *The 26th chinese control and decision conference (2014 ccdc)* (p. 1069-1071).
- Zang, T., He, Z., y Ye, D. (2010). Bacterial foraging optimization algorithm with particle swarm optimization strategy for distribution network reconfiguration. En *Advances in swarm intelligence* (Vol. 6145, p. 365-372). Springer Berlin Heidelberg.





Predicción de radiación solar mediante *deep belief network*

Solar Insolation Prediction through Deep Belief Network

Luis Carlos Ruiz Cárdenas¹, Darío Amaya Hurtado², Robinson Jiménez Moreno³

Fecha de recepción: 16 de octubre de 2014

Fecha de aceptación: 18 de septiembre de 2015

Cómo citar: Ruiz Cárdenas, L. C., Amaya Hurtado, D., & Jiménez Moreno, R. (2016). Predicción de radiación solar mediante deep belief network. *Revista Tecnura*, 20(47), 39-48. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a03

Resumen

El desarrollo continuo de las herramientas computacionales ofrece la posibilidad de realizar procesos con la capacidad de *llevar a cabo* actividades con mayor eficiencia, exactitud y precisión. Entre estas herramientas se encuentra la arquitectura neuronal, Deep Belief Network (DBN), diseñada con el propósito de colaborar en el desarrollo de técnicas de predicción para hallar información que permita estudiar el comportamiento de los fenómenos naturales, como lo es la radiación solar. En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos al manejar la arquitectura DBN para predicción de radiación solar, la cual se simula mediante la herramienta de programación Visual Studio C#, indicando el nivel de profundidad que posee esta arquitectura, como afecta la cantidad de capas y de neuronas en el entrenamiento y los resultados obtenidos para poder predecir los valores deseados en el 2014, con errores cercanos al 2 % y mayor rapidez para el entrenamiento, respecto a errores obtenidos por métodos convencionales de entrenamiento neuronal, que se encuentran por el 5% y que a su vez llevan largos periodos de entrenamiento.

Palabras Clave: Accord.Net, Afforge.Net, Back propagation (BP), Contrastive Divergence (CD), Deep Belief Network (DBN), predicción de radiación solar, Restricted Boltzmann Machine (RBM), visual studio 2010–C#.

Abstract

The continued development of computational tools offers the possibility to execute processes with the ability to carry out activities more efficiently, exactness and precision. Between these tools there is the neural architecture, Deep Belief Network (DBN), designed to collaborate in the development of prediction technics to find information that allows to study the behavior of the natural phenomena, such as the solar insolation. This paper presents the obtained results when using the DBN architecture for solar insolation prediction, simulated through the programming tool Visual Studio C#, showing the deep level that this architecture has, how it affects the number of layers and neurons per layer in the training and the results to predict the desired values in 2014, with errors close to 2% and faster to training, respect to errors obtained through conventional

¹ Ingeniero en Mecatrónica, estudiante de maestría en Ingeniería en Mecatrónica. Asistente de Investigación en el Grupo de Aplicaciones Virtuales GAV, Bogotá D.C., Colombia. Contacto: u1801196@unimilitar.edu.co.

² Ingeniero Electrónico, especializado en Automatización Industrial, magister en Teleinformática, doctor en Ingeniería Mecánica. Docente de tiempo completo en la universidad Militar Nueva. Bogotá, Colombia. Contacto: dario.amaya@unimilitar.edu.co.

³ Ingeniero Electrónico, magister en Automatización Industrial, estudiante de Doctorado en Ingeniería. Docente de la Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. Contacto robinson.jimenez@unimilitar.edu.co.

methods for neural training, which are about 5% and take long periods of training.

Keywords: Accord.Net, Afforge.Net, Back propagation (BP), Contrastive Divergence (CD), Deep

Belief Network (DBN), Restricted Boltzmann Machine (RBM), solar insolation prediction, visual studio 2010–C#.

INTRODUCCIÓN

El avance en las herramientas computacionales ha permitido desarrollar aplicaciones para analizar el comportamiento de un sistema en condiciones futuras, basadas en arquitecturas de redes neuronales, como la arquitectura *multi-layer perceptron* (MLP) (Behrang, Assareh, Ghanbarzadeh y Noghrehabadi, 2010; Paoli, Voyant y Muselli, 2010), *time delay neural network* (TDNN) (Wu Ji, 2011), *generalized fuzzy model* (GFM) (Bhardwaj, Sharma y Srivastav, 2013) o *fuzzy linea regression* (FLR) (Ramedani, Omid, Keyhani, Khoshnevisan, Soboochi, 2014) Una de las principales temáticas abordadas por este tipo de arquitecturas es la de predicción de radiación solar, desarrollada por Ramedani, Omid, Keyhani, Khoshnevisan, Soboochi, (2014) y Wu Chan (2013), la cual surge para proyectar una adecuada generación de energía fotovoltaica en cada día del año, como se insinúa en Behrang, Assareh, Ghanbarzadeh y Noghrehabadi (2010) y Wu Ji (2011), teniendo en cuenta, el efecto que pueden llegar a tener las variables meteorológicas como velocidad del viento (m/s), temperatura mínima, media y máxima (°C) (İzgi, Öztopal y Yerli, 2012), precipitación (mm/día) y humedad relativa (%), en el comportamiento de la radiación horizontal diaria (KWh/m²/día) (Bhardwaj, Sharma y Srivastav, 2013), tomando como base la información que suministra la NASA para cada día del año (Stackhouse, 2014; Chen, Duan, Cai y Liu, 2011).

En el presente trabajo se exponen los beneficios que en la actualidad puede llegar a tener la implementación de la arquitectura *deep belief network* (DBN), proponiendo una red neuronal con capas visibles y ocultas, explicando la etapa de entrenamiento no supervisado (*restricted boltzmann*

machine, RBM) y supervisado (*back propagation*, BP), integrando el algoritmo de aprendizaje *convergence divergence* (CD) y función de activación *sigmoide*, encargados de ofrecer la aproximación más cercana a los datos que se necesitan predecir. Por tanto, se empleó la herramienta de programación Visual Studio C#, con las librerías Accord.Net y Aforge.Net, con las cuales se desarrolló el proceso de predicción de radiación solar en el campus de la Universidad Militar Nueva Granada (Cajicá, Cundinamarca), con coordenadas 4°56'23,3"N y 74°01'03".8W, y se evaluaron los resultados a partir de la velocidad de entrenamiento y cálculo de la red, con la obtención de errores considerablemente mínimos, dándose a conocer como una aplicación adicional a las que se manejan en la actualidad.

Este trabajo se divide en cuatro secciones: la primera es una breve introducción a las arquitecturas DBN, en la que se exponen los avances en la generación de este tipo de algoritmos; la segunda sección hace referencia a la metodología de entrenamiento con las funciones de aprendizaje implementadas, mediante la herramienta de programación Visual Studio. Por último, se exponen y analizan los resultados relacionados con la predicción de radiación solar, integrando los errores obtenidos al entrenar la red con diferentes niveles de profundidad y cantidades de neuronas.

METODOLOGÍA

La arquitectura deep belief network (DBN)

El avance en los estudios de las arquitecturas en redes neuronales se ha llevado a cabo con el propósito de entender y aprovechar los beneficios del

comportamiento de diferentes eventos cotidianos en el medio ambiente, para lo cual se han implementado técnicas como el *multi-layer perceptron* (MLP) (Behrang, Assareh, Ghanbarzadeh y Noghrehabadi, 2010; Paoli, Voyant y Muselli, 2014), como la arquitectura básica para predicción; *artificial neural network* (ANN) (İzgi, Öztopal y Yerli, 2012; Leconte, Achard y Papillon, 2012); o *inverse artificial neural network* (ANNi) (Hernández, Rivera, Colorado y Moreno, 2012), en donde se obtienen errores cercanos entre 5 y 6 %, lo que compromete la generación de energía fotovoltaica en épocas del año con el mejor índice de absorción de la radiación solar en la superficie horizontal de la tierra.

Otras arquitecturas desarrolladas para este tipo de propósitos son: *deep neuronal network* (DNN), *deep belief network* (DBN) y *convolutional neural network* (CNN), sugeridas para la identificación de rostros de personas (Le, 2013), identificación de escritura e identificación del habla (Maas, 2013; Plahl, Sainath y Ramabhad, 2012; Hinton *et al.*, 2012), reconocimiento de números telefónicos (Mohamed *et al.*, 2011). Así, se da solución, de forma eficiente, a los problemas de aprendizaje de máquina y se obtiene una mayor abstracción de los datos que se están estudiando (Hamel y Douglas, 2010), dependiendo del nivel de profundidad que tenga la red neuronal. En el estudio de radiación solar se puede presentar un mejor comportamiento en el entrenamiento de la red, como una disminución considerable del error, para asegurar los resultados esperados por un sistema fotovoltaico.

Para llevar a cabo la arquitectura DBN, se propone realizar el proceso que se expone en la figura 1, el cual parte por indicar la cantidad de variables de entrada, el número de salidas que se desea obtener, el nivel de profundidad (*deep*) de la red neuronal o cantidad de capas ocultas y el número de neuronas que se busca manejar por capa. Luego de definir la estructura del DBN, se adelanta el entrenamiento, que se divide en dos etapas: el no supervisado (*restricted boltzmann machine*, RBM), con el objetivo de entrenar capa a capa de

la red y así obtener los pesos actualizados encargados de conectar capa a capa y los *bias* asignados a cada neurona de las capas y el supervisado con el método *back propagation* (BP). De esta manera, finalizó el entrenamiento de la arquitectura DBN, con los datos dispuestos para validación.

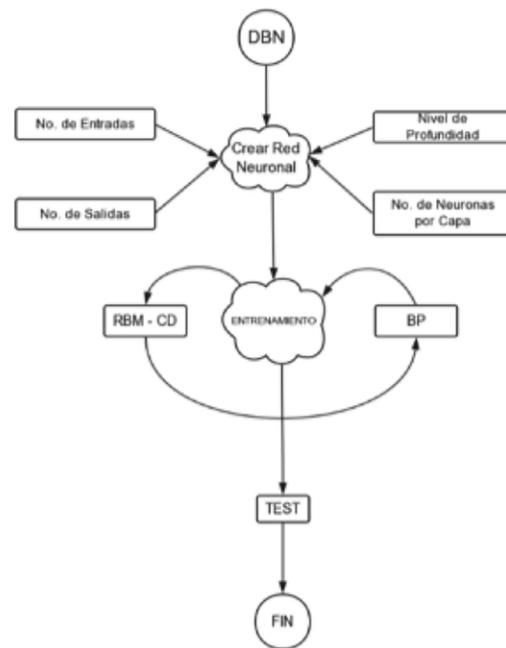


Figura 1. Flujo de proceso de la arquitectura DBN

Fuente: elaboración propia.

A partir del proceso de evaluación de la arquitectura DBN, se propone plantear este método para la predicción de radiación solar, con resultados cercanos al valor deseado entre el 2 y 0,1 %. Esta arquitectura permite ser operada desde herramientas de programación como *Python* (Hamel y Douglas, 2010; Ferreira y Andrade, 2013), *Matlab* (Sohn, Jung, Lee y Hero, 2011), y *Visual Studio C#* (De Grazia y Stoianov, 2012), donde cada una de estas posee sus propias librerías, que para el caso de *Visual Studio C#* maneja *Accord.Net* y *Afforge.Net*, y se usa para crear y manipular redes neuronales, como se manifiesta en el desarrollo de este trabajo.

Entrenamiento no supervisado, restricted boltzmann machine (RBM) (T4)

La primera etapa de entrenamiento se realiza con el método *restricted boltzmann machine* (RBM), que se expone en la figura 2. Este se interpreta como una red neuronal estocástica, con propiedades de predecir sin exactitud con probabilidad aleatoria (Fischer e Igel, 2014), capaz de entrenar redes multicapa.

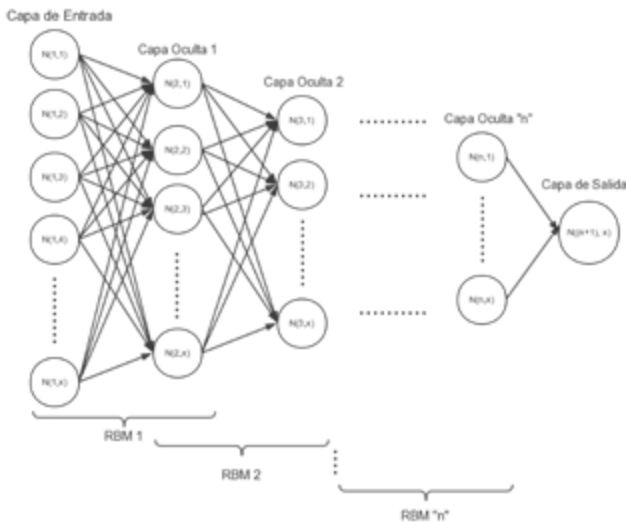


Figura 2. Entrenamiento no supervisado con RBM

Fuente: elaboración propia.

Este entrenamiento realiza el proceso capa a capa como se expone en la figura 3, sin entrenar la capa de salida. Así, se obtiene la actualización de los pesos encargados de unir la capa oculta con la capa visible, que con el algoritmo de aprendizaje *contrastive divergence* (CD) (Fischer e Igel, 2014; Tieleman, 2008) y la función de activación *sigmoide*, ofrece el de reconocimiento de patrones durante el proceso de entrenamiento.

Para el desarrollo de este método de aprendizaje, se tiene en cuenta las ecuaciones que manejan Fischer e Igel (2014). El entrenamiento no supervisado busca actualizar de forma progresiva los pesos (w'_{ij} , w_{ij}) (Plahl, Sainath y Ramabhad, 2012), encargados de unir la capa visible (v_j) con la capa oculta (h_j), mediante la ecuación (1), haciendo uso de la distribución probabilística de la capa oculta a la capa visible ($p(h|v)$), la distribución probabilística de la capa visible a la capa oculta ($p(v|h)$) en la ecuación (2) y la función de energía (E) entre las mismas, manejando la ecuación (8).

$$w'_{ij} = w_{ij} + \sum \frac{\partial \ln \mathcal{L}(\theta|v)}{\partial w_{ij}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \ln \mathcal{L}(\theta|v)}{\partial w_{ij}} = - \sum_h p(h|v) \left(\frac{\partial E(h|v)}{\partial w_{ij}} \right) + \sum_{v,h} p(v,h) \left(\frac{\partial E(v,h)}{\partial w_{ij}} \right) \quad (2)$$

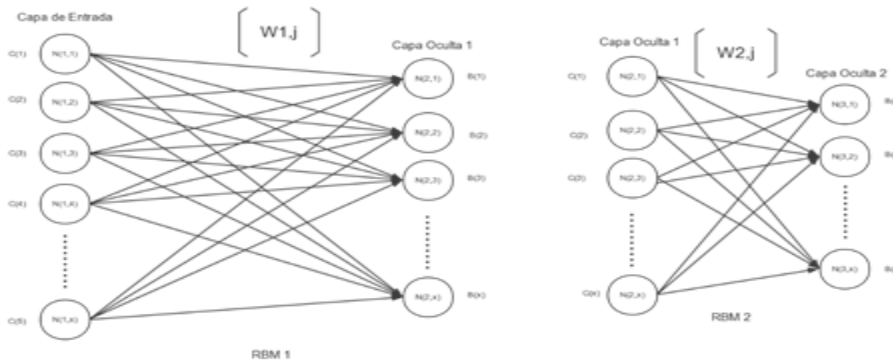


Figura 3. Entrenamiento capa a capa de la arquitectura DBN, con el método de entrenamiento RBM

Fuente: elaboración propia

Que en redes neuronales, se identifica cada término de la ecuación (2), con la ecuación (3) y la ecuación (4).

$$\sum_h p(h|v) \left(\frac{\partial E(h|v)}{\partial w_{ij}} \right) = sig \left(\sum_{j=1}^m w_{ij} v_j + c_j \right) v_j \quad (3)$$

$$\sum_{v,h} p(v,h) \left(\frac{\partial E(v,h)}{\partial w_{ij}} \right) = - \sum_v p(v) \sum_h p(h|v) h_j v_j \quad (4)$$

Que de forma simplificada, la probabilidad condicional $i=1$ de la capa oculta en una $(p(H_i=1|v))$ en la ecuación (5), se hace con la función de activación *sigmoide* (*sig*) de las ecuaciones (6) y (7).

$$\frac{\partial \ln \mathcal{L}(\theta|v)}{\partial w_{ij}} = p(H_i = 1|v) v_j - \sum_v p(v) p(H_i = 1|v) \quad (5)$$

$$p(H_i = 1|v) = sig \left(\sum_{j=1}^m w_{ij} v_j + c_i \right) \quad (6)$$

Donde:

$$p(v) = \sum_h p(v,h) = \frac{1}{Z} \sum_h e^{-E(v,h)} \quad (7)$$

$$E(v,h) = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} h_i - \sum_{j=1}^m b_j v_j - \sum_{i=1}^m c_i h_i \quad (8)$$

Que para determinar la distribución de Gibbs $(p(v))$, se hace necesario hallar la función de partición (Z) , con la ecuación (9):

$$Z = \sum e^{-E(v,h)} \quad (9)$$

Otras de las ventajas que tiene este tipo de entrenamiento es que, a medida que avanza, permite actualizar los *bias* de la capa visible (c_j), correspondientes a un valor característico de las neuronas de las capas de estudio, con la ecuación (10) y los *bias* de la capa oculta (b_j) (Ji, Zhang y Zhang, 2014), con la ecuación (13).

$$c'_i = c_i + \frac{\partial \ln \mathcal{L}(\theta|v)}{\partial c_i} \quad (10)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (11):

$$\frac{\partial \ln \mathcal{L}(\theta|v)}{\partial c_i} = p(H_i = 1|v) - \sum_v p(v) p(H_i = 1|v) \quad (11)$$

Y para el actualizar los pesos b_j :

$$b'_j = b_j + \frac{\partial \ln \mathcal{L}(\theta|v)}{\partial b_j} \quad (12)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (13):

$$\frac{\partial \ln \mathcal{L}(\theta|v)}{\partial b_j} = v_j - \sum_v p(v) v_j \quad (13)$$

Entrenamiento supervisado, back propagation (BP)
 Para el desarrollo del entrenamiento supervisado con BP o sintonización fina (Hinton *et al.*, 2012), se tiene en cuenta el proceso que se expone en la figura 4. Este entrenamiento considera el método

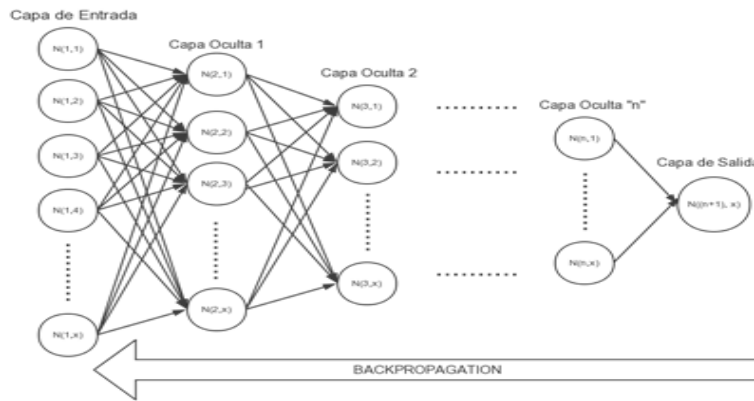


Figura 4. Entrenamiento supervisado, BP

Fuente: elaboración propia

matemático *mean square error* (MSE) como se maneja en Bhardwaj, Sharma, y Srivastav (2013), el cual se aplica para observar el error entre el valor deseado y el valor obtenido, devolviéndose hasta terminar el entrenamiento en la primera capa.

El desarrollo del algoritmo BP emplea la ecuación (14), para determinar el error cuadrático medio δ_k (Xu, Yamada y Seikiya, 2014).

$$Ep = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \delta_k^2 \quad (14)$$

Donde, el valor de error para la capa de salida δ_k en la ecuación (15), depende del valor deseado d_k , el valor que se obtuvo y_k , la salida de la función de activación *sigmoide* f^k (Velilla, Valencia y Jaramill, 2014; Meng, Jia y Wang, 2013) de la ecuación (16) y el valor de cada neurona de la red net_k de la ecuación (17) (Graxiola, Melin y Valdez, 2014), con los pesos w_{ij} los datos de la capa visible y_j , los *bias* de las neuronas de la capa oculta b_k .

$$\delta_k = (d_k - y_k) * f^k(net_k) \quad (15)$$

$$f^k(net_k) = \frac{1}{1 + e^{-net_k}} \quad (16)$$

$$net_k = \sum_{j=1}^L w_{ij} y_j + b_k \quad (17)$$

RESULTADOS

Teniendo en cuenta la arquitectura DBN y el flujo de proceso de entrenamiento de este tipo de red neuronal artificial, se requiere establecer la cantidad de entradas y salidas que va a tener la red neuronal. La salida de la red neuronal es la predicción de radiación solar ($KWh/m^2/día$) del año a tener en cuenta; las variables de entrada son aquellas que pueden afectar el comportamiento de la radiación solar como lo son: velocidad del viento (m/s), temperatura mínima, media y máxima ($°C$) (İzgi, Öztopal y Yerli, 2012), precipitación ($mm/día$) y humedad relativa (%), agregando el comportamiento de la radiación horizontal diaria del año anterior ($KWh /m^2/día$) (Bhardwaj, Sharma y Srivastav, 2013) como lo ha considerado Behrang, Assareh, Ghanbarzadeh y Noghrehabadi (2010), y Chen, Duan, Cai y Liu (2011), adquiriendo la información suministrada por la base de datos de la NASA (Stackhouse, 2014).

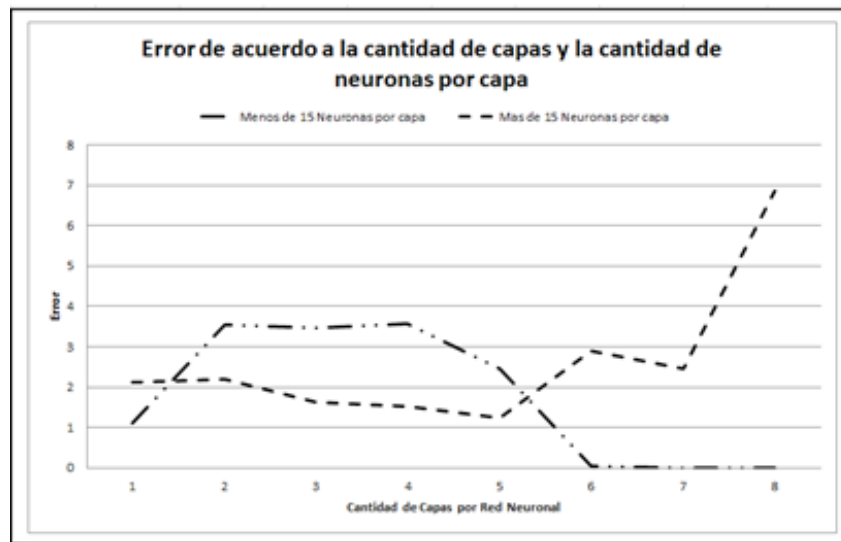


Figura 5. Error de acuerdo con la cantidad de capas, sujeto a la cantidad de neurona que posee por capa

Fuente: elaboración propia

Al indicar qué parámetros rigen tanto la entrada como la salida, se agrega a la construcción de la red, la profundidad que se desea manejar, lo cual hace referencia a la cantidad de capas que va a tener la red neuronal. En la figura 5 se detallan los posibles resultados del comportamiento de la red, donde se muestra que a mayor cantidad de capas y con un menor número de neuronas por capa, se pueden obtener errores aproximados a 0. Para el caso de estudio, se propone una profundidad de 9, donde el primer nivel de profundidad tendrá 10 neuronas y en las siguientes capas desciende de a una neurona.

Al tener presente cómo será la arquitectura de la red neuronal, se toman los datos que ofrece la NASA (Stackhouse, 2014) desde 1997 al 2013, para desarrollar la etapa de entrenamiento, el cual se encarga de tomar el 80 %, correspondiente al periodo de 1997-2010, y el 20 % para validación, correspondiente al periodo de 2011-2013 como sugieren Gopal, Woodcock y Strah (1999). Para la etapa de entrenamiento no supervisado, correspondiente al método de entrenamiento RBM con el algoritmo de entrenamiento CD, el cual se

encarga de aplicar de forma interna las ecuaciones (1), (10) y (11). El entrenamiento supervisado se sugiere para realizar la sintonización fina a través del método BP, para hallar el MSE que se encuentra en la ecuación (13).

De esta manera se realiza la etapa de entrenamiento hasta llegar a la capa oculta, otorgándole un valor sólido a los pesos iniciales de la red neuronal y, a su vez, inicializando de forma adecuada los valores de las *bias* correspondientes a los valores asignados a cada neurona que se encuentra en cada capa o cada nivel de profundidad de la red. Así, el resultado final es una estructura de capas entrenada en cortos lapsos de tiempo como se puede observar en la figura 6, que a medida que se pueda ir aumentando la cantidad de capas tiende a tardar mucho tiempo; sin embargo, al no manejar gran cantidad de neuronas por capa, tiende a conservar el tiempo de entrenamiento.

Considerando los resultados obtenidos, con la arquitectura que se propuso, el entrenamiento y la validación desarrollados, cada uno con su método y algoritmo correspondiente, se buscó predecir la radiación del año en curso (2014). Para esto se



Figura 6. Tiempo que tarda en realizar el entrenamiento, dependiendo de la cantidad de capas y el número de neuronas por capa

Fuente: elaboración propia.

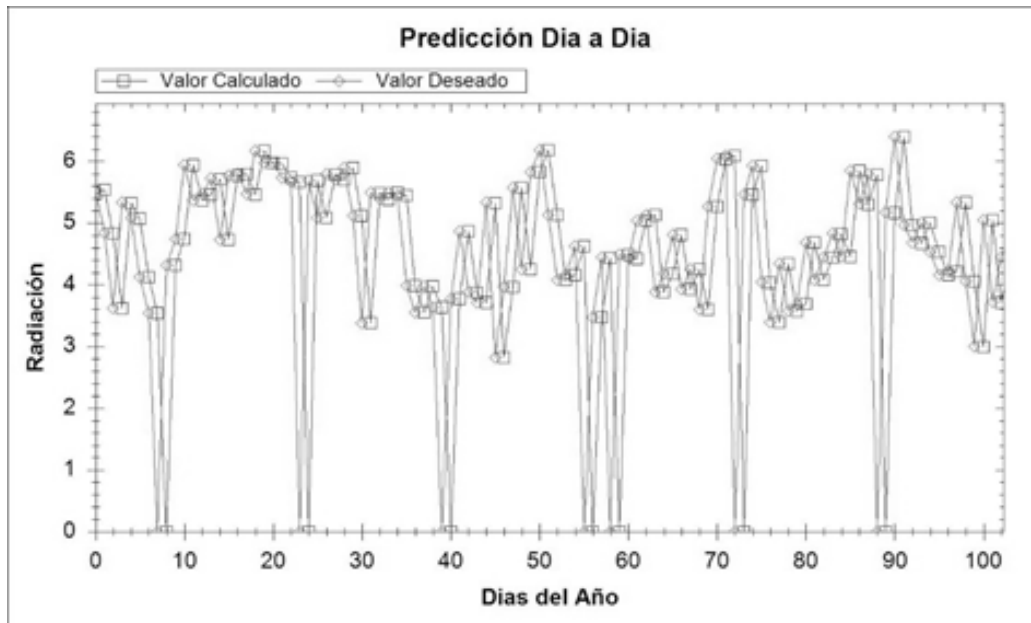


Figura 7. Resultados de predicción de radiación solar para el año 2014, considerando los datos de 2013

Fuente: elaboración propia

ingresó a la red los datos correspondientes al año 2013 ($^{\circ}\text{C}$, m/s, %, mm/día y $\text{KWh/m}^2/\text{día}$), y se obtuvieron radiaciones aproximadas a las esperadas con el año 2014, como se puede evidenciar en la figura 7.

Con el manejo de la arquitectura DBN se observó que se obtienen errores cercanos al 2,0 %; esto indica mejores resultados a los expuestos por Behrang, Assareh, Ghanbarzadeh y Noghrehabadi (2010), ya que ellos manejan las mismas entradas pero con errores cercanos a 5,21 % mediante la técnica MLP, implementando métodos matemáticos para hallar el error como el *root mean square error* (RMSE) y *mean square error* (MSE) como lo proponen Bhardwaj, Sharma y Srivastav (2013).

CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos en el desarrollo de esta etapa de predicción del proyecto, se puede llegar a incrementar la integración de los sistemas fotovoltaicos a la red, debido a que es posible

predecir la radiación horizontal, garantizando una adecuada generación de energía fotovoltaica sin obtener posibles pérdidas en los diferentes días del año.

Se propone, como trabajo futuro, la predicción de radiación solar, con el manejo de los datos registrados por el grupo de investigación en áreas rurales, en cada minuto, entre los que se encuentran: radiación solar horizontal, velocidad del viento, humedad relativa y temperatura del ambiente, para predecir tanto diaria como anualmente la radiación solar en este tipo de áreas donde se puede aprovechar este recurso natural y orientarlo a la población que no posee acceso a la red eléctrica convencional.

FINANCIAMIENTO

Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada. Financiación del proyecto IMP_ING 1576, año 2014.

REFERENCIAS

- Bhardwaj, S.; Sharma, V.; Srivastava, S.; Sastry, O.S.; Bandyopadhyay, B.; Chandel S.S. & Gupta, J.R.P. (julio de 2013). Estimation of solar radiation using a combination of Hidden Markov Model and generalized Fuzzy model. *Solar Energy*, 93, 43-54. DOI:10.1016/j.solener.2013.03.020
- De Grazia, M.; Stoianov, I. & Zorzi, M. (2012). Parallelization of Deep Networks. *European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence* (pp. 25-27). Brujas, Bélgica. Recuperado el 29 de septiembre de 2014, de: <http://www.i6doc.com/en/livre?GCOI=28001100967420>
- Fischer, A. & Igel, C. (enero de 2014). Training restricted Boltzmann machines: An introduction. *Pattern Recognition* 47(1), 25-39. HYPERLINK "<http://dx.doi.org/10.1016/j.patcog.2013.05.025>" \t "doilink" DOI:10.1016/j.patcog.2013.05.025 .
- Gopal, S.; Woodcock, C. & Strahler, A. (febrero de 1999). Fuzzy Neural Network Classification of Global Land Cover from a 1° AVHRR Data Set. *Remote Sensing of Environment* 67(2), 230-243. DOI:10.1016/S0034-4257(98)00088-1.
- Hernández, J.A.; Rivera, W.; Colorado, D. & Moreno-Quintanar, G. (abril de 2012). Optimal COP prediction of a solar intermittent refrigeration system for ice production by means of direct and inverse artificial neural networks. *Solar Energy* 86(4), 1108-1117. DOI:10.1016/j.solener.2011.12.021.
- İzgi, E.; Öztöpal, A.; Yerli, B.; Kemal, M. & Duran, A. (febrero de 2012). Short–mid-term solar power prediction by using artificial neural networks. *Solar Energy* 86(2), 725-733. DOI:10.1016/j.solener.2011.11.013.
- Ji, N.; Zhang, J. & Zhang, C. (septiembre de 2014). A sparse-response deep belief network based on rate distortion theory. *Pattern Recognition* 47(9), 3179-3191. DOI:10.1016/j.patcog.2014.03.025.
- Leconte, A.; Achard, G. & Papillon, P. (Julio de 2012). Global approach test improvement using a neural network model identification to characterise solar combisystem performances. *Solar Energy* 86(7), 2001-2016. DOI:10.1016/j.solener.2012.04.003.
- Meng, X.; Jia, M. & Wang, T. (23 de diciembre de 2013). Neural network prediction of biodiesel kinematic viscosity at 313 K. *Fuel*, 121, 133-140. DOI:10.1016/j.fuel.2013.12.029.
- Paoli, C.; Voyant, C.; Muselli, M. & Nivet, M. (diciembre de 2010). Forecasting of preprocessed daily solar radiation time series using neural networks. *Solar Energy* 84(12), 2146-2160. DOI:10.1016/j.solener.2010.08.011.
- Wu, J. & Chan, C. (diciembre de 2013). Prediction of hourly solar radiation with multi-model framework. *Energy Conversion and Management*, 76, 347-355. DOI:10.1016/j.enconman.2013.07.067
- Behrang, M.; Assareh, E.; Ghanbarzadeh, A. & Noghrehabadi, A.R. (agosto de 2010). The potential of different artificial neural network (ANN) techniques in daily global solar radiation modeling based on meteorological data. *Solar Energy* 84(8), 1468-1480. DOI:10.1016/j.solener.2010.05.009
- Chen C.; Duan, S.; Cai, T. & Liu, B. (noviembre de 2011). Online 24-h solar power forecasting based on weather type classification using artificial neural network. *Solar Energy* 85(11), 2856-2870. DOI:10.1016/j.solener.2011.08.027.
- Ferreira, S. & Andrade, A. (2013). Development and validation of a scale to assess the integration of the LCMS in the formative process in higher education. *Information Systems and Technologies* (pp. 1-10). Lisboa. Recuperado el 29 de septiembre de 2014, de: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6082328>
- Gaxiola, F.; Melin, P.; Valdez, F. & Castillo, O. (1 de marzo de 2014). Interval type-2 fuzzy weight adjustment for backpropagation neural networks with application in time series prediction. *Information Sciences*, 260, 1-14. DOI:10.1016/j.ins.2013.11.006
- Hamel, P. & Eck, D. (2010). Learning features from music audio with deep belief networks. *11th International Society for Music Information Retrieval Conference* (pp. 339-344). Recuperado el 29 de septiembre de 2014, de: http://ismir2010.ismir.net/proceedings/ismir2010-58.pdf?origin=publication_detail

- Hinton, G.; Deng, L.; Yu, D.; Dahl, G.; Mohamed, A.; Jaitly, N.; Senior, A.; Vanhoucke, V.; Nguyen, P.; Sainath, T. & Kingsbury, B. (2012). Deep Neural Networks for Acoustic Modeling in Speech Recognition: The Shared Views of Four Research Groups. *Signal Processing Magazine* 29(6), 82-97. DOI:10.1109/MSP.2012.2205597
- Le, Q. (mayo de 2013). Building high-level features using large scale unsupervised learning. *Proceedings of the 29 th International Conference on Machine Learning*, (pp. 8595-8598). DOI:10.1109/ICASSP.2013.6639343.
- Maas, A.L.; Hannum, A.Y. & Ng, A.Y. (2013). Rectifier nonlinearities improve neural network acoustic models. *30 th International Conference on Machine Learning*, 28. Atlanta, Georgia. Recuperado el 27 de septiembre de 2014, de: http://web.stanford.edu/~awni/papers/relu_hybrid_icml2013_final.pdf
- Mohamed, A.; Sainath, T.; Dahl, G.; Ramabhadran, B.; Hinton, G. & Picheny, M. (2011). Deep Belief Networks using discriminative features for phone recognition. *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (pp. 5060-5063). DOI:10.1109/ICASSP.2011.5947494
- Plahl, C.; Sainath, T.N.; Ramabhadran, B. & Nahamoo, D. (2012). Improved pre-training og deep belief networks using sparse encoding symmetric machines. *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (pp. 4165-4168). DOI: 10.1109/ICASSP.2012.6288836.
- Ramedani, Z.; Omid, M.; Keyhani, A.; Khoshnevisan, B. & Soboohi, H. (noviembre de 2014). A comparative study between fuzzy linear regression and support vector regression for global solar radiation prediction in Iran. *Solar Energy*, 109, 135-143. DOI:10.1016/j.solener.2014.08.023.
- Santana, J.C. (junio de 2006). Predicción de series temporales con redes neuronales: una aplicación a la inflación colombiana. *Revista Colombiana de Estadística* 29(1), 77-92. Recuperado el 29 de septiembre de 2014, de: http://www.emis.de/journals/RCE/V29/V29_1_77Santana.pdf
- Sohn, K.; Jung, D.Y.; Lee, H. & Hero, A. (2011). Efficient learning of sparse, distributed, convolutional feature representations for object recognition. *Computer Vision*, (pp. 2643-2650). Barcelona, España. DOI:10.1109/ICCV.2011.6126554
- Stackhouse, P. (27 de septiembre de 2014). *NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER)*. Recuperado el 27 de septiembre de 2014, de: <http://power.larc.nasa.gov/>
- Tieleman, T. (2008). Training Restricted Boltzmann Machines using Approximations to the Likelihood Gradient. *International Conference on Machine Learning* (pp. 1064-1071). Helsinki, Finlandia. DOI:10.1145/1390156.1390290
- Velilla, E.; Valencia, J. & Jaramillo, F. (28 de junio de 2014). Performance evaluation of two solar photovoltaic technologies under atmospheric exposure using artificial neural network models. *Solar Energy*, 107, 260-271. DOI:10.1016/j.solener.2014.04.033.
- Ji, W. & Chee, K.C. (mayo de 2011). Prediction of hourly solar radiation using a novel hybrid model of ARMA and TDNN. *Solar Energy* 85(5), 808-817. DOI:10.1016/j.solener.2011.01.013.
- Xu, J., Yamada, K., Seikiya, K., Tanaka, R., & Yamane, Y. (octubre de 2014). Effect of different features to drill-wear prediction with back propagation neural network. *Precision Engineering* 38(4), 791 -798. DOI:10.1016/j.precisioneng.2014.04.007





Distribución óptima de turbinas en parques eólicos mediante PSO considerando el efecto sombra

Optimal Distribution of Wind Farm Turbines Using PSO Considering the Wake Effect

Juan David Ramírez Ramírez¹, Alejandro Garcés Ruiz², Jose Santiago Arrieta Giraldo³

Fecha de recepción: 24 de septiembre de 2014

Fecha de aceptación: 18 de septiembre de 2015

Cómo citar: Ramírez Ramírez, J. D., Arrieta Giraldo, J. S., & Garcés Ruiz, A. (2016). Distribución óptima de turbinas en parques eólicos mediante PSO considerando el efecto sombra. *Revista Tecnura*, 20(47), 49-55. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a04

Resumen

En este artículo se presenta una propuesta novedosa para ubicar de manera óptima las turbinas de un parque eólico, considerando el efecto sombra y cualquier disposición de vientos, usando la técnica metaheurística de optimización por enjambre de partículas (PSO). De igual manera se muestra la disposición que genera mayor energía para un caso propuesto, teniendo en cuenta las restricciones de distancias entre las turbinas, el área del parque eólico y el efecto sombra. La optimización de la energía generada por el parque se realiza para una rosa de los vientos en un periodo de tiempo determinado.

Palabras clave: efecto sombra, metaheurística, optimización, parque eólico, rosa de los vientos, sistemas eléctricos de potencia.

Abstract

This paper proposes a novel algorithm based on particle swarm optimization (PSO) for optimal placement of the turbines in a wind farm. Wake effect is considered for different directions and magnitudes of wind speeds according to a given compass rose. Likewise, energy optimization for a proposed case is shown which takes into account constraints related to distances between the turbines, the wind farm area and the wake effect. Simulation results demonstrate the efficiency of the proposed algorithm.

Keywords: Compass rose, Metaheuristic, Optimization, Power systems, Wake effect, Wind farm.

¹ Ingeniero Electricista, estudiante de maestría en Ingeniería Eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Contacto: daviramirez@utp.edu.co

² Ingeniero Electricista, magister en Ingeniería Eléctrica, doctor en Ingeniería Electrónica. Profesor asociado programa de Ingeniería Eléctrica Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Contacto: alejandro.garces@utp.edu.co

³ Ingeniero Electricista, estudiante de Maestría en Ingeniería Eléctrica Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Contacto: jsarrieta@utp.edu.co

INTRODUCCIÓN

La velocidad del viento dentro de un parque eólico se ve afectada por la ubicación de las turbinas, ya que estas toman parte de la energía cinética del viento, disminuyendo la velocidad del mismo en la parte posterior de la turbina. Este efecto es denominado *efecto sombra*.

Un gran número de modelos numéricos, de diversa complejidad, se han desarrollado para describir el efecto sombra. En general, pueden ser clasificados explícita o implícitamente. La manera explícita o cinemática consiste en modelos que utilizan los perfiles de velocidad propios, describiendo el efecto de manera semiempírica. Los modelos implícitos del efecto sombra fueron desarrollados como alternativas a partir de los modelos explícitos, los cuales se basan en aproximaciones de Naviere-Stokes o de ecuaciones de transporte de vorticidad. El modelado exacto de la distribución de la velocidad del viento en un parque eólico es una tarea bastante complicada y muchos de los parámetros necesarios no están disponibles fácilmente (Gresch *et al.*, 2005). La elección de un adecuado modelo depende de tres factores: el tiempo de cálculo deseado, la precisión necesaria de predicción, y la información del viento disponible como parámetro de entrada. En este trabajo se realiza un enfoque simplificado para el modelado del efecto sombra y se observa cómo este puede afectar la energía producida por un parque eólico según la disposición de las turbinas.

Se pretende optimizar la energía generada por el parque eólico mediante la distribución de las turbinas, aprovechando la información suministrada por la rosa de los vientos para el caso experimental propuesto, y teniendo en cuenta todas las restricciones espaciales a las que se ve sometida cada turbina, como el tamaño del parque eólico, el no traslape entre turbinas y disminuyendo en la mayor medida el efecto sombra.

La técnica metaheurística, adelantada en este proceso de optimización, fue *particle swarm*

optimization (PSO) la cual consiste en la naturaleza (algoritmo bioinspirado), en concreto, en el comportamiento social del vuelo de las bandadas de aves y el movimiento de los bancos de peces. El algoritmo PSO es un sistema multiagente, en el que las partículas son agentes simples que se mueven por el espacio de búsqueda, guardan y posiblemente comunican la mejor solución que han encontrado. Además, el movimiento de las partículas por el espacio está guiado por las partículas que tienen la mejor solución del momento (Del Valle *et al.*, 2008).

ASPECTOS TEÓRICOS

En la actualidad no existen muchos reportes en la literatura especializada acerca de este tema, el cual toma fuerza debido a la importancia de la energías renovables y el correcto aprovechamiento de la mismas. Una de las principales dificultades que enfrenta esta temática es que los datos de viento no cuentan con muchos registros de las condiciones reales; desafortunadamente, la mayoría de los datos históricos de viento no fueron recogidos con fines de evaluación de energía eólica. Así, los resultados a menudo representan las condiciones medias cerca de centros de población en terrenos relativamente llanos o áreas de poca elevación y no de los lugares en donde van a ser ubicados los parques eólicos, lo que se convierte en un gran problema debido a la aleatoriedad del viento y un fenómeno difícil de modelar con la rosa de los vientos.

Por otra parte, es importante la selección del sitio para la ubicación del parque eólico que depende, entre otros elementos, del potencial eólico (velocidad media del viento), de la cantidad de aerogeneradores o turbinas a instalar (área a utilizar), de las características circundantes de actividad humana y de producción, de la distancia a las líneas del sistema eléctrico al que se va a conectar y de la facilidad de acceso al predio.

Expresiones para considerar el efecto sombra

Considerar el efecto sombra para la ubicación óptima de las turbinas de un parque eólico constituye una tarea importante ya que puede afectar directamente la capacidad de generación de energía del parque.

El efecto sombra producido por una turbina eólica es representado por un cono con centro en el eje de la turbina como se muestra en la figura 1. El radio del cono crece linealmente de acuerdo con la ecuación (1).

$$R(s) = Rr(1 + \xi \cdot s) \quad (1)$$

En donde ξ es una constante que depende del tipo de terreno ($\xi \cong 0,075$ para terrenos llanos) y s es la distancia relativa respecto al radio $s = x/Rr$ (González, 2011).

La velocidad nominal del viento se ve afectada después de ser aprovechada por una turbina de acuerdo con la ecuación (2).

$$v = v_o \left(1 - \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{(1 + \xi \cdot s)^2} \right) \quad (2)$$

En donde v_o es la velocidad nominal del viento y C_T es un coeficiente adimensional el cual depende del tipo de turbina. En la mayoría de los casos C_T puede ser aproximado como $C_T = 7/v_o$

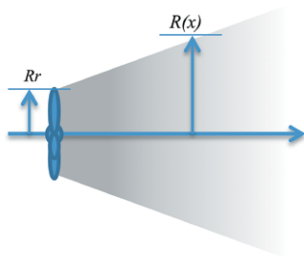


Figura 1. Representación esquemática del efecto sombra producido por una turbina eólica

Fuente: elaboración propia.

El efecto sombra debe considerar la superposición de múltiples turbinas. En tal caso, la velocidad está dada por la suma cuadrática de los efectos como se muestra en la ecuación (3).

$$\left(1 - \frac{v_i}{v_o} \right)^2 = \sum \left(1 - \frac{v_{ij}}{v_o} \right)^2 \quad (3)$$

En donde v_{ij} es la velocidad en la turbina i por efecto de la turbina j . Utilizando el mismo procedimiento se puede determinar la velocidad del viento en turbinas ubicadas detrás de varias turbinas. Sin embargo, en este caso la velocidad de la turbina debe considerar el efecto sombra de todas las turbinas que estén ubicadas delante de ella. Por tanto, se calculan tantas velocidades como turbinas se encuentren delante de ella (Zhang y Wang, 2009).

La velocidad resultante en la turbina deseada se calcula finalmente usando una relación cuadrática que se muestra en la ecuación (4).

$$v_n = v_o - \sqrt{(v_o - v_{1n})^2 + (v_o - v_{2n})^2 \dots + (v_o - v_{(n-1)n})^2} \quad (4)$$

El efecto sombra puede cambiar según la disposición de las turbinas respecto a la dirección del viento, de allí la importancia de una adecuada disposición de las turbinas en el parque eólico.

Técnica metaheurística de optimización por enjambre de partículas

La técnica metaheurística de optimización implementada es PSO, en la cual los agentes de búsqueda (partículas) intercambian información. Las partículas modifican su dirección en función de las direcciones de las partículas de su vecindario. Esta técnica almacena la experiencia propia o historia de cada agente. La partícula decide su nueva dirección en función de la mejor posición por la que pasó anteriormente (Del Valle *et al.*, 2008).

La población del algoritmo se inicia de forma aleatoria y evoluciona, iteración tras iteración,

buscando siempre la solución más óptima posible, y fundamenta la búsqueda exclusivamente en los valores de la función objetivo.

Es importante tener una buena codificación del problema para el buen funcionamiento del algoritmo PSO, siendo una técnica estocástica referida en fases (inicialización y transformación). PSO tiene operadores de movimiento, pero no de evolución como la mutación o el cruzamiento, que están presentes en otras técnicas. La técnica no crea nuevas partículas durante su ejecución, sino que siempre son las mismas partículas iniciales modificadas a lo largo del proceso, las cuales suelen tener una convergencia rápida a buenas soluciones (Shi, 2004).

Rosa de los vientos

La información de la rosa de los vientos es de suma importancia para modelar el futuro comportamiento de un parque eólico, esta contiene la información de los posibles vientos que ocurrirán en determinados periodos de esta manera es posible realizar los estimados de la producción de energía del parque eólico.

Tabla 1. Disposición de los vientos en un día

Velocidad en eje X (m/s)	Velocidad en eje Y (m/s)	Duración (horas)
12	0	3,5
-12	0	1,5
0	12	3
0	-12	5
8,4853	8,4853	3
-8,4853	8,4853	2
8,4853	-8,4853	3
-8,4853	-8,4853	3

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta que el viento tiene una dirección y una velocidad diferente dependiendo de la hora del día, este se modelara como una matriz

en la cual se tiene un estimado de la dirección, la magnitud de la velocidad y la duración de este comportamiento hasta cumplir las 24 horas del día. En la tabla 1, se tiene la información correspondiente a la variación de la velocidad, dirección y duración de los vientos para la realización de las pruebas.

Cálculo de la energía total producida por el parque eólico

Para el problema en cuestión es importante el cálculo de la energía producida por el parque eólico debido a que esta es la variable que se quiere optimizar, de manera que se obtenga una distribución favorable de turbinas. La potencia que proveerá cada turbina y la energía total producida por el parque eólico fueron calculadas como se expresa en las ecuaciones (5) y (6) respectivamente (Barthelmie, Hansen, Frandsen y Rathman, 2009).

$$P_i = P_{nom} \left(\frac{v_i}{v_o} \right)^3 \quad (5)$$

En donde P_{nom} es la potencia nominal de la turbina. P_i y v_i son la potencia producida por la turbina i y la velocidad que llega a la turbina i respectivamente.

$$E = \sum_{j=1}^k \left(\sum_{i=1}^n P_{ij} \right) t_j \quad (6)$$

En la ecuación (6), P_{ij} es la potencia generada por la turbina i para la disposición de viento j ; n es la cantidad de turbinas; t_j es la duración de la disposición de viento; j y k representan la cantidad de disposiciones de viento obtenidas durante 24 horas.

Restricciones espaciales de la ubicación de turbinas en un parque eólico

Es importante tener una estrategia adecuada para la ubicación de las turbinas en un parque eólico teniendo en cuenta las restricciones de extensión

del terreno que delimitan el área del parque eólico y el área que ocupa cada turbina más un factor de seguridad. Cabe resaltar que el área que ocupa una turbina corresponde a un área circular de radio igual al alabe de la misma, esto debido al *yoke angle*, que le permite realizar giros de 360° sobre el eje del poste con el fin de ubicarse perpendicularmente a la dirección de entrada del viento.

Estas serán restricciones que se deben tener en cuenta en el momento de modelar y codificar el problema de optimización.

METODOLOGÍA

Un componente fundamental para dar solución óptima al problema es su codificación, mostrar cómo se ajustaron las variables, las restricciones y la función objetivo a la técnica metaheurística PSO. En principio, se muestran todos los componentes del problema y se describe cómo es su codificación.

La función objetivo del problema que para la técnica PSO toma el nombre de función de adaptación y tiene como objetivo evaluar la energía generada por cada configuración específica de turbinas. Es muy importante destacar que esta función de adaptación tiene en cuenta las infactibilidades que pueda presentar una configuración de turbinas en específico; esto se realiza penalizando la función de adaptación mediante la resta de un valor importante a la energía generada por la configuración del parque eólico para cada infactibilidad que este presente, ya que el problema es de maximización.

Las infactibilidades para este problema son interpretadas como traslape en el movimiento de las turbinas y salir del área permitida para la construcción del parque como se mencionó anteriormente.

La técnica PSO necesita definir las partículas, las cuales se encargan de explorar el espacio de soluciones y encontrar el óptimo del problema. Para este caso cada partícula corresponde a una matriz que contiene la información de la ubicación geográfica de cada una de las turbinas que componen el parque eólico.

El desplazamiento o velocidad de cada partícula en busca del óptimo se compone de tres componentes que se exponen a continuación:

1. El vector velocidad o desplazamiento de la anterior iteración, lo que indica que el algoritmo PSO tiene memoria.
2. Un componente cognitivo que indica la decisión que tomará la partícula. Este componente depende de su propia experiencia, dicho de otra manera, representa la distancia entre la posición actual y la mejor conocida por esa partícula.
3. El componente social que apunta la decisión que tomará la partícula en base a la influencia del resto de partículas que componen la nube, es decir, representa la distancia entre la posición actual y la mejor posición encontrada por vecindario.

El modelo matemático resultante es el que representa el fundamento del algoritmo PSO.

Todas las partículas se van moviendo hasta llegar a una solución de buena calidad, basadas en la propuesta descrita anteriormente y el proceso iterativo hasta donde se define el criterio de parada (Zhang, Liu y Clerc, 2003).

En el desarrollo del algoritmo fue necesario crear una función que, cabe resaltar, permite calcular el efecto sombra entre turbinas sin importar la dirección del viento; esto es posible gracias a la rotación de ejes, que hace que las coordenadas cartesianas en las cuales se encuentran ubicadas las turbinas, se alineen con el vector de dirección del viento, simplificando los cálculos enormemente, permitiendo calcular la energía producida por la configuración de turbinas que se esté analizando.

RESULTADOS

Como sistema se prueba se consideró un área de 3 km², del cual se tuvieron consideraciones como que el terreno es llano y además cuadrado. La cantidad de turbinas eólicas disponibles para ser ubicadas es de 50, las cuales tienen un diámetro de 75 metros cada una. Se consideró también una

distancia de seguridad entre las turbinas del 5 % de su diámetro. La potencia nominal de cada una de estas turbinas es de 2MW y la velocidad nominal del viento es de 12 m/s.

Para el algoritmo de PSO se consideró una población de 500 individuos aleatorios en donde cada individuo corresponde a una posible ubicación de las 50 turbinas en el parque eólico. Esta población aleatoria fue controlada de manera que todas las soluciones iniciales fueran factibles. El algoritmo fue ejecutado durante 100 iteraciones de la cual se escogió la mejor solución (la ubicación de las turbinas que hará que se produzca mayor cantidad de energía en el parque) obtenida durante todo el proceso.

El resultado obtenido después de 100 iteraciones se muestra en la figura 2, la cual corresponde a la ubicación de las turbinas en el parque eólico de mejor calidad encontrada por el algoritmo de PSO.

La figura 2 también ilustra el área delimitada para la ubicación del parque eólico y la disposición geográfica de cada turbina en el cual es representado por un círculo formado por el movimiento circular de cada turbina teniendo en cuenta su

diámetro de modo que no haya traslape entre dos o más turbinas.

Cabe señalar que la disposición encontrada se considera de buena calidad más no óptima, debido a que esta distribución fue obtenida mediante la técnica metaheurística PSO la cual no es exacta.

Por otro lado, en la figura 3 se detalla la evolución que se tuvo durante las 100 iteraciones en la función objetivo la cual es maximizar la energía producida.

Se puede observar cómo el algoritmo PSO fue mejorando paulatinamente durante las primeras 33 iteraciones hasta llegar a un valor de energía producida de 2312,65 Mw/día, el cual no siguió mejorando durante las iteraciones restantes por lo cual se considera que no era necesario ejecutar el algoritmo durante más iteraciones, debido a que no es probable una mejora considerable en la función objetivo en iteraciones posteriores.

FINANCIAMIENTO

Universidad Tecnológica de Pereira

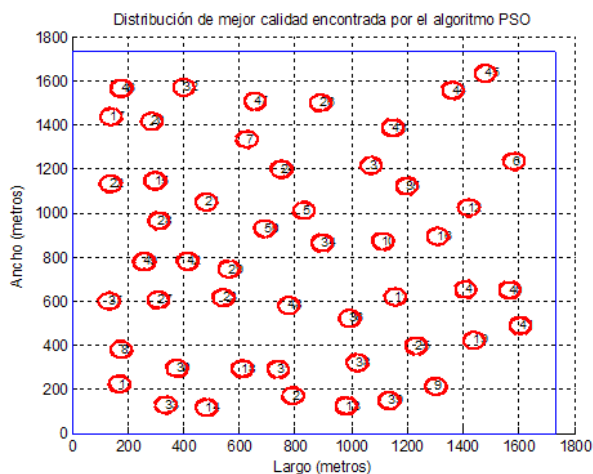


Figura 2. Distribución de mejor calidad obtenida

Fuente: elaboración propia.

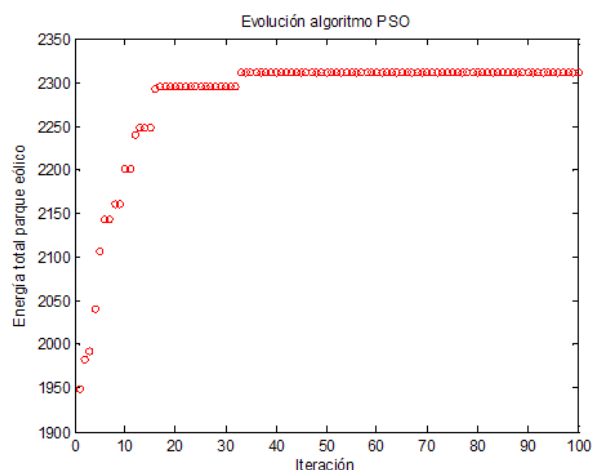


Figura 3. Evolución del algoritmo PSO durante las 100 iteraciones

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

La metodología implementada permite obtener respuestas de buena calidad para dar solución al problema de la ubicación óptima de turbinas en un parque eólico considerando el efecto sombra.

El trabajo propuesto en este artículo realiza un aporte novedoso ya que no existen muchos planteamientos para dar solución al tema tratado, siendo este el más útil y permitiendo encontrar resultados de buena calidad.

Es importante destacar que el uso eficiente de los recursos, en este caso el viento, para generar energía se convierte en un factor decisivo y determinante a la hora de encontrar buenas relaciones costo/beneficio en una planta de generación eólica, como lo muestran los resultados.

Es posible profundizar este trabajo codificando el problema con otras técnicas de solución, que permitan mejorar los resultados.

REFERENCIAS

- Barthelmie, R. J.; Hansen, K.; Frandsen, S. T. & Rathmann, O. (2009). Modeling and measuring flow and wind turbine wakes in large wind farms offshore. *Wind Energy* 12(5), 431-444.
- Del Valle, Y.; Kumar Venayagamoorthy, G.; Mohagheghi, S.; Hernandez, J. & Harley, R.G. (2008). Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation* 12(2), 171-195.
- González Longatt, F. (2011). Wake effect in wind farm performance: Steady-state and dynamic behavior. *Renewable Energy* 39(1), 329-338.
- Gresch, M.; Shewarega, F.; Erlich, I.; Bachmann, U. & Koch, F. (2005). Consideration of wind farm wake effect in power system dynamic simulation. *Power Tech*, 1-7.
- Shi, Y. (2004). Feature article on particle swarm optimization. *IEEE Neural Network Society*, 8-13.
- Zhang, W.; Liu, Y. & Clerc, M. (2003). An adaptive PSO algorithm for reactive power optimization. *Proc. 6th Int. Conf. Advances in Power System Control, Operation and Management* 1(497), 302-307.
- Zhang, X.Y. & Wang, W.Q. (2009). Wind farm and wake effect modeling for simulation of a studied power system. *IEEE/PES power systems conference and exposition*, 1-6.





Una propuesta para la clasificación emocional de un álbum a partir de la letra de sus canciones

A Proposal for the Emotional Classification of an Album Using the Lyrics of its Songs

Francisco Javier Moreno Arboleda¹, John Freddy Duitama Muñoz²,
Luis Fernando Montoya Gómez³

Fecha de recepción: 10 de noviembre de 2014

Fecha de aceptación: 18 de septiembre de 2015

Cómo citar: Francisco Javier Moreno Arboleda, John Freddy Duitama Muñoz, & Luis Fernando Montoya Gómez. (2016). Una propuesta para la clasificación emocional de un álbum a partir de la letra de sus canciones. *Revista Tecnura*, 20(47), 57-70. doi: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a05>

Resumen

Los grandes volúmenes de datos que se manejan actualmente demandan métodos automáticos para la extracción de conocimiento. En particular, la minería de texto se ocupa de la extracción de conocimiento a partir de textos. En este artículo se proponen dos algoritmos para determinar a partir de las letras de sus canciones, la tendencia emocional de un álbum. Se sigue un enfoque jerárquico: las categorías emocionales para clasificar los álbumes agrupan a las subcategorías emocionales de las canciones. Esto es razonable, porque una canción tiende a estar orientada a una (sub)categoría emocional específica. De esta forma la categoría emocional de un álbum es una ponderación de las subcategorías emocionales de sus canciones. Esta ponderación puede ser configurada por parte del analista musical, lo que permite incorporar un elemento de subjetividad en la propuesta. Mediante una serie de experimentos se evaluaron los algoritmos propuestos. Aunque es

necesario experimentar con más datos, los resultados evidenciaron la conveniencia, consistencia y utilidad de los algoritmos propuestos.

Palabras clave: análisis musical, categorías emocionales, clasificación, minería de texto.

Abstract

Current volumes of data require automated methods for knowledge extraction. In particular, text mining deals with extracting knowledge from texts. In this paper we propose two algorithms to determine, from the lyrics of its songs, the emotional tendency of an album. We follow a hierarchical approach: the emotional categories to classify the albums group the emotional subcategories of the songs. This is reasonable because a song tends to be oriented to a specific emotional (sub) category. In this way, the emotional category of an album is a weighting of the emotional subcategories of its songs. This weighting can be customized by the musical analyst,

¹ Ingeniero de Sistemas, magister en Ingeniería de Sistemas, doctor en Ingeniería-Sistemas. Docente de la Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. Contacto: ijmoreno@unal.edu.co

² Ingeniero de Sistemas, magister en Ingeniería de Sistemas, doctor en Informática. Docente de la Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Contacto: john.duitama@udea.edu.co

³ Ingeniero de sistemas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, Colombia. Contacto: lfmontoyag@unal.edu.co

which allows incorporating a subjective element in our proposal. Through a series of experiments we evaluated our algorithms. Although it is necessary to experiment with more data, our results show the

expediency, consistency, and usefulness of our proposed algorithms.

Keywords: classification, emotional categories, musical analysis, text mining.

INTRODUCCIÓN

Entre las funcionalidades que ofrecen sitios de música como *Allmusic.com*, *Stereomood.com*, *Musicoverly.com*, *www.musicoverly.com* y *Friendllymusic.com*, entre otros, está la clasificación de las canciones en categorías emocionales. Esto permite a los usuarios crear listas de reproducción y encontrar canciones relacionadas con su estado de ánimo. En estos sitios la clasificación emocional de las canciones se logra a partir de la retroalimentación de los usuarios. Otra alternativa es obtener esta clasificación teniendo en cuenta las características inherentes de una canción como su letra y su sonido. Para ello se pueden aplicar métodos de *minería de texto* y *de audio*.

Por ejemplo, en Hu, Downie y Ehmann (2009) se presenta un método para clasificar canciones en 18 categorías emocionales. Para esto se consideraron características lingüísticas (la letra de la canción) y espectrales del audio. Para evaluar la precisión de la clasificación, la cual estuvo alrededor del 60 %, se aplicaron diferentes técnicas a la letra: *bag-of-words* (Ferragina y Scaiella, 2011), *part-of-speech* (Diesner, 2006), *function words* (Roberts, 2002) y *stemming* (Jivani, 2011). Además, los autores mostraron que la incorporación de las características espectrales del audio no mejoró significativamente la precisión de la clasificación.

En Panagakis y Kotropoulos (2011) se propone el algoritmo LRRC (*low-rank representation-based Classification*) para la clasificación emocional de canciones, el cual solo usa las características espectrales del audio. Los experimentos se hicieron con 180 bandas sonoras de películas y seis categorías emocionales: *happiness* (felicidad), *sadness*

(tristeza), *fear* (temor), *anger* (ira), *surprise* (sorpresa) y *tenderness* (ternura). El LRRC se comparó con algunos de los algoritmos más usados en tareas de clasificación: *sparse representations-based classifier* (Zhang et al., 2012), *support vector machines* (SVM) (Fletcher, 2009; Chang y Lin, 2011) y *nearest neighbor* (Liu, Moore, Gray y Yang, 2004); el LRRC obtuvo la precisión más alta (alrededor del 64 %).

En Trohidis, Tsoumakas, Kalliris y Vlahavas (2011) se evalúa el rendimiento de cuatro algoritmos de clasificación emocional de canciones: *label powerset* (Cherman, Monard y Metz, 2011), *binary relevance* (Read, Pfahringer, Holmeiz y Frank, 2011), *Random k-labelsets* (Tsoumakas, Katakis y Vlahavas, 2011) y *multilabel k-nearest neighbor*. Los autores consideraron que una canción puede pertenecer simultáneamente a varias categorías emocionales. Se consideraron seis categorías emocionales: *amazement-surprise* (asombro-sorpresa), *happiness-satisfaction* (felicidad-satisfacción), *relaxation-calmness* (relajación-calma), *quietness-stillness* (tranquilidad-quietud), *sadness-loneliness* (tristeza-soledad) y *anger-fear* (enojo-temor). El algoritmo *random k-labelsets* obtuvo la precisión más alta (alrededor del 80 %).

En Li y Ogiwara (2013) se definieron 13 categorías emocionales para la clasificación de las canciones. Se consideraron 30 características espectrales obtenidas mediante MARSYAS, una herramienta para el procesamiento de audio orientada a las aplicaciones de recuperación de información de la música. Como método de clasificación se usó LIBSVM (Chang y Lin, 2011) (*A Library for Support Vector Machines*), el cual se fundamenta en los SVM. La precisión estuvo alrededor del 46 %.

En el presente artículo se presenta una propuesta para obtener la *clasificación emocional de un álbum* a partir de la clasificación emocional de sus canciones. La propuesta es flexible porque permite que el usuario especifique el grado con el que las categorías emocionales asociadas con las canciones contribuyen a la categoría emocional de un álbum; por ejemplo, permite la incorporación de elementos *subjetivos* en la ponderación de las emociones.

El artículo está organizado así. Primero, se presentan los fundamentos teóricos para lograr la clasificación emocional de una canción. Posteriormente se expone la propuesta para la clasificación emocional de un álbum. Luego se muestran los experimentos y el análisis de los resultados. Por último, se plantean algunas conclusiones y se sugieren trabajos futuros.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para ejemplificar las técnicas descritas en esta sección para analizar la letra de una canción y obtener su clasificación emocional, se trabajará con la letra de la canción "Come on, get happy" del grupo The Partridge Family. La letra de la canción es:

*Hello world, hear the song that we're singing
Come on, get happy
A whole lotta loving is what we'll be bringing
We'll make you happy
We had a dream we'd go traveling together
And spread a little loving, then we'll keep moving on
Something always happens whenever we're together
We get a happy feeling when we're singing a song
Traveling along, there's a song that we're singing
Come on, get happy
A whole lotta loving is what we'll be bringing
We'll make you happy
We'll make you happy
We'll make you happy*

Paso 1. Se convierte la letra de la canción a minúsculas, se eliminan los saltos de línea y todos los caracteres que no son letras. Nótese que al eliminar el apóstrofo, también se eliminan las letras correspondientes a las contracciones 're, 'll, 'd, 's.

hello world hear the song that we singing come on get happy a whole lotta loving is what we be bringing we make you happy we had a dream we go traveling together and spread a little loving then we keep moving on something always happens whenever we together we get a happy feeling when we singing a song traveling along there a song that we singing come on get happy a whole lotta loving is what we be bringing we make you happy we make you happy we make you happy

Paso 2. Se eliminan las *stop words* (Feldman y Sanger, 2007), es decir, aquellas palabras que aportan poco o nada de significado para clasificar emocionalmente el texto, como artículos, pronombres o preposiciones:

hello world hear song singing come get happy lotta loving bringing make happy dream go traveling spread loving keep moving happens get happy feeling singing song traveling song singing come get happy lotta loving bringing make happy make happy make happy

Paso 3. Se aplica la técnica de *stemming*, de la cual se obtiene la raíz de cada palabra. Por ejemplo, la raíz de la palabra *feeling* es *feel*. Existen varios algoritmos para realizar el *stemming*, entre los más conocidos están el de Porter (Noraida y Noor, 2012), el de Snowball (Agichtein y Gravano, 2000) y el de Lovins (Jivanis, 2011). En el presente artículo se usa el algoritmo de Snowball, ya que con este se obtiene la mejor precisión y es ampliamente difundido.

hello world hear song sing come get happi lotta love bring make happi dream go travel spread love keep move happen get happi feel sing song travel song sing come get happi lotta love bring make happi make happi make happi

Nótese que el algoritmo de Snowball genera la palabra *happi* como la raíz de la palabra *happy*, debido a que una de sus reglas es $(*v^*) Y \rightarrow I$ (es decir que, al tener una vocal entre consonantes seguida de la letra *Y*, se cambia la *Y* por *I*) (Sharma, 2012).

Paso 4. Los SVM (*support-vector machines*) son un tipo de algoritmos de aprendizaje supervisado, desarrollado por Vapnik (Fletcher, 2009; Chang y Lin, 2011), que sirven para tareas de clasificación y regresión basados en datos de entrenamiento. La idea esencial es lograr que el algoritmo aprenda a partir de ejemplos (situaciones), de los cuales se conoce su salida correcta (clasificación); para ello los SVM separan los puntos (datos de entrenamiento)

en dos clases, de tal forma que se maximiza la distancia entre el hiperplano que separa las clases y los puntos más cercanos que pertenecen a estas.

Primero se debe entrenar a los SVM con situaciones cuya clasificación se conoce, esto genera un modelo de clasificación del problema (Fletcher, 2009). Luego, el modelo recibe una situación *x* cuya clasificación desconoce, el modelo entonces compara la situación *x* con situaciones cuya clasificación conoce y genera la clasificación para la situación *x*.

En las figuras 1 y 2 se muestra cómo se usaron los SVM para la clasificación emocional de las canciones.

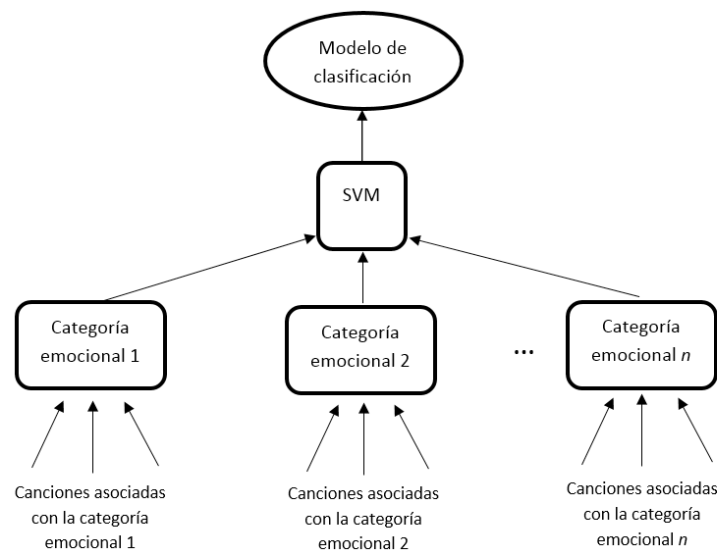


Figura 1. Modelo de clasificación para las canciones

Fuente: elaboración propia.

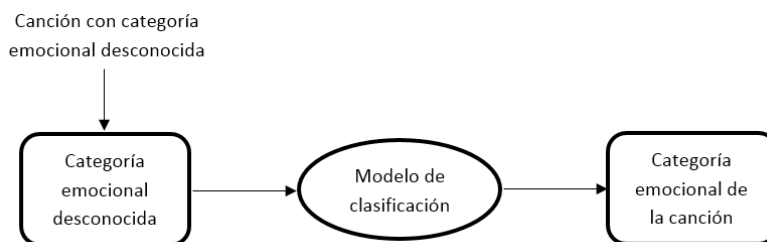


Figura 2. Aplicación del modelo de clasificación para una canción

Fuente: elaboración propia.

Dado que los SVM funcionan con parámetros numéricos, tanto en la entrada como en la salida, se debe convertir la letra en un formato válido de entrada para los SVM. Para ello se usó el TF-IDF (*term frequency – inverse document frequency*) (Ramos, 2003).

El TF-IDF es una medida numérica que expresa qué tan relevante es un término (palabra) para un documento con relación a un conjunto de documentos. Esta medida se utiliza a menudo como un factor de ponderación en la recuperación de información y en la minería de texto. Los términos con más alto TF-IDF son, por lo general, aquellos que mejor caracterizan la temática de un documento. Se calcula mediante la ecuación (1).

$$TFIDF(j) = \frac{t_j}{|d|} * \log \frac{N}{n_j} \quad (1)$$

Donde:

t_j : es el número de veces que aparece el término j en el documento d .

$|d|$: es el número de términos distintos que tiene el documento d .

N : es el número total de documentos.

n_j : es el número de documentos que contienen el término j .

Para el ejemplo en curso, considérese $j = feel$, $t_j = 1$, $|d| = 23$ (letra de la canción correspondiente al paso 3), $N = 10$ canciones y $n_j = 4$. Entonces $TFIDF(feel) = (1/23) * \log(10/4) = 0,01730174$.

De esta forma, a un término j se le asigna un peso en el documento d así: a) el TF-ID es alto cuando el término j ocurre muchas veces en un número pequeño de documentos, b) el TF-ID es bajo cuando el término j ocurre pocas veces en un documento y ocurre en muchos documentos y c) el TF-ID es muy bajo cuando el término j ocurre en todos los documentos.

El TF-IDF se suele normalizar, ya que el uso de esta frecuencia de los términos puede conducir a problemas como *keyword spamming*, es decir, la repetición de un término en un documento con el propósito de mejorar su clasificación en un

sistema de recuperación de información o la generación de un sesgo hacia los documentos largos, haciendo que se vean más importantes de lo que son debido a la alta frecuencia del término en el documento. Para normalizarlo, se obtiene el TF-IDF para cada término j del documento d , se suman los cuadrados de estos y se obtiene la raíz cuadrada de dicha sumatoria (ecuación (2)). El resultado pasa a dividir el TF-IDF del término j y ese será su TF-IDF *normalizado*. Para el ejemplo, la sumatoria fue 0,0808 y la raíz = 0,2844. Los resultados para cinco términos de la canción se muestran en la tabla 1.

$$TFIDF_{normalizado}(j) = \frac{TFIDF(j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{|d|} TFIDF(k)^2}} \quad (2)$$

Tabla 1. Resultados del TF-IDF para siete términos de la canción

Término(j)	t_j	n_j	TF-IDF	TF-IDF normalizado
bring	2	2	0,061	0,214
dream	1	2	0,031	0,107
feel	1	4	0,017	0,061
get	3	5	0,039	0,138
go	1	5	0,013	0,046

Fuente: elaboración propia.

Continuando con el paso 4, se consideró un conjunto SCAT de 18 categorías emocionales definidas en Hu, Downie y Ehmann (2009): 1) *aggression* (agresión), 2) *anger* (ira), 3) *angst* (angustia), 4) *broodiness* (desasosiego), 5) *calm* (calma), 6) *cheerfulness* (alegría), 7) *confidentiality*, (confianza), 8) *depression* (depresión), 9) *desire* (anhelo), 10) *dreaminess* (ensoñamiento), 11) *earnest* (seriedad), 12) *excitation* (excitación), 13) *grief* (dolor), 14) *happiness* (felicidad), 15) *pessimism* (pesimismo), 16) *romanticism* (romanticismo), 17) *sadness* (tristeza) y 18) *upbeatness* (optimismo).

Se seleccionaron 30 canciones (datos de entrenamiento) *para cada categoría*. La selección de

las canciones para cada una de las 18 subcategorías emocionales se hizo mediante la clasificación emocional proporcionada por sitios como *Stereomood.com*, *Musicoverly.com*, *Moodstream.gettyimages.com*, *Thesixtyone.com* y *Lastfm.es*. Estos sitios facilitaron, en gran medida, la clasificación, pues cuentan con grandes bases de datos que relacionan las canciones con sus respectivos estados emocionales. Sin embargo, como no todas las categorías emocionales utilizadas en estos sitios coincidían con las categorías utilizadas en el presente artículo, se estableció una correspondencia con las más similares. Además, para la selección de canciones de algunas de las categorías (como *Earnest*, *Confident* y *Brooding*) se tuvo que acudir a la opinión de usuarios en redes sociales y a búsquedas específicas mediante Google.

Por último, luego de obtener los valores TF-IDF para cada uno de los 23 términos de la canción, se ejecutó el modelo generado por los SVM, el cual a partir de los datos de entrenamiento clasificó la canción "Come on, get happy" en la categoría *happy*, lo cual concuerda con la clasificación usualmente dada a esta canción en los sitios mencionados.

METODOLOGÍA Y ALGORITMO PROPUESTO

El objetivo del algoritmo es *clasificar un álbum* en una categoría emocional basado en la clasificación emocional de cada una de sus canciones. Para ello, se consideró un conjunto *CAT* de seis categorías emocionales tomadas del modelo de Tellegen-Watson-Clark (Trohidis, K., Tsoumakas, G., Kalliris, G., & Vlahavas, 2011; Robertson, 2004): 1) *amazement-surprise* (asombro-sorpresa), 2) *happiness-satisfaction* (felicidad-satisfacción), 3. *relaxation-calmness* (relajación-calma), 4) *quietness-stillness* (tranquilidad-quietud), 5) *sadness-loneliness* (tristeza-soledad), 6) *anger-fear* (enojo-temor). Estas categorías agrupan al conjunto *SCAT* de 18 subcategorías en las cuales se clasifica una canción. Es decir, se consideran seis

categorías para clasificar un álbum y 18 subcategorías para clasificar una canción. Esto es razonable porque un álbum está compuesto de canciones y una canción tiende a estar orientada a una subcategoría emocional específica; por tanto, la categoría emocional de un álbum será una ponderación de las subcategorías de sus canciones. Por ejemplo, si un álbum tiene diez canciones, donde cinco son clasificadas en *depression*, tres en *grief* y dos en *broodiness*, se podría concluir que la tendencia predominante del álbum es de *sadness-loneliness*, que es una categoría que abarca a las tres subcategorías predominantes en sus canciones.

Con el fin de establecer el grado (peso) en que las subcategorías contribuyen con las categorías, se debe notar que algunas de las 18 subcategorías no se diferencian claramente de otras, por ejemplo, *cheerfulness*, *happinnes* y *upbeatness*. Además, una persona podría considerar, por ejemplo, que el dolor (subcategoría *grief*) conlleva principalmente a un estado de tristeza (categoría *sadness-loneliness*), y otra podría considerar que dicha subcategoría conlleva principalmente a un estado de ira (categoría *anger-fear*). Por tanto, existe un elemento de subjetividad que el analista musical puede incorporar en el modelo propuesto.

Para afrontar este aspecto, se definió una matriz de pesos emocionales W , la cual indica cuán importante (peso) es una subcategoría para una categoría. Esta matriz es *parametrizable por parte del analista musical*, ya que para alguien muy melancólico, la tristeza puede en cierto grado dar felicidad; sin embargo, existe una restricción:

$$\sum_{i=1}^l W(j, i) = 1, 1 \leq j \leq k$$
, donde k es el número de categorías (6) y l es el número de subcategorías (18). Es decir, la sumatoria de los pesos de las subcategorías que aportan a una categoría debe ser igual a 1. Se estableció además que una categoría está compuesta por un subconjunto de las 18 subcategorías. Por ejemplo, en la tabla 2 la categoría *amazement-surprised* (1) está compuesta por 70 % de la subcategoría *excitation* (12) y 30 % de la subcategoría *happiness* (14).

Tabla 2. Matriz de pesos emocionales W

Cat.	Subcategoría																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Σ	
1												0,7		0,3						1
2						0,3								0,5		0,1		0,1		1
3					0,4	0,1	0,1		0,1	0,1	0,1			0,1						1
4				0,1	0,4		0,2				0,3									1
5			0,2					0,2					0,2		0,2		0,2			1
6	0,3	0,3						0,3										0,1		1

Fuente: elaboración propia.

Considerando lo anterior se propone el algoritmo *emoAlbumClass1*. El algoritmo *emoAlbumClass1* calcula el estado emocional de un álbum basado en la subcategoría emocional de cada una de sus n canciones. Es decir, el algoritmo calcula el peso que obtiene cada álbum por categoría y lo clasifica en la categoría en donde obtenga mayor peso.

Algoritmo *emoAlbumClass1*

Input:
 CAT[1..k] //Arreglo de nombres de las k categorías para clasificar un álbum
 SCAT[1..l] //Arreglo de nombres de las l subcategorías para clasificar una canción
 CA[1..n] /*Arreglo de códigos (correspondientes a las posiciones de SCAT) de las subcategorías para las n canciones de un álbum */
 $W[1..k, 1..l], W[i][j]$ in $[0,1], i, j: 1 \leq i \leq k, 1 \leq j \leq l$
 //Matriz de pesos
 Output:
 CAT[p] //Categoría a la que pertenece el álbum,
 $1 \leq p \leq k$
Begin
 1. $R[1..k], R[i] = 0, i: 1 \leq i \leq k$ //R[i] corresponde a CAT[i].
 2. **For** $i = 1$ **to** k **Do**
 3. **For** $j = 1$ **to** n **Do**
 4. $R[i] = R[i] + W[i, CA[j]]$ /*Sumatoria de los pesos aportados por la subcategoría CA[j] de cada canción a la categoría R[i] */
 5. **End For**
 6. **End For**

7. $max =$ elemento p en R con mayor valor $R[p], 1 \leq p \leq k$

8. **Return** CAT[max] //Retorna la categoría que obtuvo el máximo valor en R

End

A continuación se propone el algoritmo *emoAlbumClass2*. El algoritmo *emoAlbumClass2*, al igual que el algoritmo *emoAlbumClass1*, calcula el estado emocional de un álbum basado en el estado emocional de sus canciones, con la diferencia que el algoritmo *emoAlbumClass2* considera adicionalmente la subcategoría secundaria emocional de cada canción generada por los SVM.

Algoritmo *emoAlbumClass2*

//Considera la subcategoría principal y secundaria de cada canción
 Input:
 CAT[1..k] //Arreglo de nombres de las k categorías para clasificar un álbum
 SCAT[1..l] //Arreglo de nombres de las l subcategorías para clasificar una canción
 CA1[1..n] /*Arreglo de códigos (correspondientes a las posiciones de SCAT) de las subcategorías principales para las n canciones de un álbum */
 CA2[1..n] /*Arreglo con los códigos (correspondientes a las posiciones de SCAT) de las subcategorías secundarias para las n canciones de un álbum */
 $W[1..k, 1..l], W[i][j]$ in $[0, 1], i, j: 1 \leq i \leq k, 1 \leq j \leq l$
 //Matriz de pesos
 Output:

$CAT[p]$ //Categoría a la que pertenece el álbum,
 $1 \leq p \leq k$
Begin
1. $R[1..k]$, $R[i] = 0$, $i: 1 \leq i \leq k$ // $R[i]$ corresponde a $CAT[i]$.
2. **For** $i = 1$ **to** k **Do**
3. **For** $j = 1$ **to** n **Do**
4. $R[i] = R[i] + W[i, CA1[j]] + W[i, CA2[j]]$ /* Sumatoria de los pesos aportados por las subcategorías $CA1[j]$ y $CA2[j]$ de cada canción a la categoría $R[i]$ */
5. **End For**
6. **End For**
7. $max =$ elemento p en R con mayor valor $R[p]$, $1 \leq p \leq k$
8. **Return** $CAT[max]$ //Retorna la categoría que obtuvo el máximo valor en R
End

Ejemplo: considérense las canciones del álbum *Slippery When Wet*, de Bon Jovi, cada una con su subcategoría principal y secundaria como se muestra en la tabla 3.

Nótese que las subcategorías principal y secundaria de cada canción son similares. Esto sugiere que cada canción presenta una tendencia hacia una emoción en particular.

a) Aplicación del algoritmo *emoAlbumClass1*. Sean: $CAT = [Amazement-surprise, Happiness-satisfaction, Relaxation-calmness, Quietness-stillness, Sadness-loneliness, Anger-fear]$.

$SCAT = [Aggression, Anger, Angst, Broodiness, Calm, Cheerfulness, Confidentiality, Depression, Desire, Dreaminess, Earnest, Excitation, Grief, Happiness, Pessimism, Romanticism, Sadness, Upbeatness]$.

$CA = [11, 6, 8, 13, 11, 6, 15, 15, 16, 15]$.

Y sea W la matriz de pesos de la tabla 4. El resultado para la categoría ganadora es:

$R[5] = W(5, CA[1]) + W(5, CA[2]) + \dots + W(5, CA[10]) = 0 + 0 + 0,2 + 0,2 + 0 + 0 + 0,2 + 0,2 + 0 + 0,2 = 1$.

Los resultados se muestran en la tabla 4, en gris se muestra la categoría ganadora *sadness-loneliness* (5).

b) Aplicación del algoritmo *emoAlbumClass2*.

Sean CAT , $SCAT$ y W como en el caso a), $CA1 = [11, 6, 8, 13, 11, 6, 15, 15, 16, 15]$ y $CA2 = [8, 14, 11, 11, 3, 9, 3, 3, 10, 8]$.

El resultado para la categoría ganadora es:

$R[5] = W(5, CA1[1]) + W(5, CA1[2]) + \dots + W(5, CA1[10]) + W(5, CA2[1]) + W(5, CA2[2]) + \dots + W(5, CA2[10]) = 2$.

Tabla 3. Subcategoría principal y secundaria de cada canción del álbum *Slippery When Wet*.

Canción (autores)	Subcategoría principal	Subcategoría secundaria
"I'd Die For You" (J. Bon Jovi, R. Sambora)	<i>Earnest</i> (11)	<i>Depression</i> (8)
"Let It Rock" (J. Bon Jovi, R. Sambora)	<i>Cheerfulness</i> (6)	<i>Happiness</i> (14)
"Livin' On A Prayer" (J. Bon Jovi, R. Sambora, D. Child)	<i>Depression</i> (8)	<i>Earnest</i> (11)
"Never Say Goodbye" (J. Bon Jovi, R. Sambora)	<i>Grief</i> (13)	<i>Earnest</i> (11)
"Raise Your Hands" (J. Bon Jovi, R. Sambora)	<i>Earnest</i> (11)	<i>Angst</i> (3)
"Social Disease" (J. Bon Jovi, R. Sambora)	<i>Cheerfulness</i> (6)	<i>Desire</i> (9)
"Wanted Dead Or Alive" (J. Bon Jovi, R. Sambora)	<i>Pessimism</i> (15)	<i>Angst</i> (3)
"Wild In The Streets" (J. Bon Jovi)	<i>Pessimism</i> (15)	<i>Angst</i> (3)
"Without Love" (J. Bon Jovi, R. Sambora, D. Child)	<i>Romanticism</i> (16)	<i>Dreaminess</i> (10)
"You Give Love A Bad Name" (J. Bon Jovi, R. Sambora, D. Child)	<i>Pessimism</i> (15)	<i>Depression</i> (8)

Fuente: elaboración propia.

Los resultados se muestran en la tabla 5, en gris se muestra la categoría ganadora, de nuevo *sadness-loneliness* (5).

Nótese que los números subrayados representan el aporte de la subcategoría principal de cada canción a la categoría i , por ejemplo, $W[i, CA1[j]]$; mientras que los números sin subrayar representan el aporte de la subcategoría secundaria j de cada canción a la categoría i , por ejemplo, $W[i, CA2[j]]$.

EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

En una primera fase de la verificación experimental, se trabajó con una base de datos de 540 canciones para generar el modelo de clasificación de estas en las 18 subcategorías, es decir, 30 canciones por cada subcategoría. Luego se tomó un conjunto de prueba de otras 15 canciones por cada subcategoría (270 canciones) y se logró un grado de precisión en la clasificación del 65 %. Para el procesamiento de la letra de cada canción (pasos en "Fundamentos teóricos") se usó *Rapid*

Miner, un software especializado para minería de datos. Los algoritmos *emoAlbumClass1* y *emoAlbumClass2* se implementaron en *Java*.

A continuación se seleccionaron seis artistas cada uno con cuatro álbumes (24 álbumes en total). Estos últimos están conformados por canciones entre las 270 ya clasificadas. Con el fin de obtener la clasificación emocional de cada álbum, se aplicaron los algoritmos *emoAlbumClass1* y *emoAlbumClass2*.

Además, se consideró una tercera estrategia para obtener la clasificación emocional de un álbum: se tomó la letra de cada una de sus canciones y se unieron como si formasen la letra de una sola *canción*. Se generó entonces un segundo modelo de clasificación de las canciones en las seis categorías del conjunto CAT. Se trabajó con la misma base de datos de 540 canciones para la fase de entrenamiento y 270 para la fase de prueba. Se logró un porcentaje de precisión en la clasificación de las canciones del 82 %, esto es razonable porque ahora el número de categorías para

Tabla 4. Ejemplo del algoritmo *emoAlbumClass1*

Cat.	Canción										Σ	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1												0
2		0,3				0,3			0,1			0,7
3	0,1	0,1			0,1	0,1						0,4
4	0,3				0,3							0,6
5			0,2	0,2			0,2	0,2		0,2		1
6			0,3									0,3

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Ejemplo del algoritmo *emoAlbumClass2*

Cat.	Canción										Σ	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1		0+0,3										0,3
2		0,3+0,5	0+0,1	0+0,1		0,3+0			0,1+0			1,4
3	0,1+0	0,1+0,1	0+0,3	0+0,3	0,1+0	0,1+0,1			0+0,1			1,2
4	0,3				0,3+0							0,6
5	0+0,2		0,2+0	0,2+0	0,2		0,2+0,2	0,2+0,2		0,2+0,2		2
6	0+0,3		0,3+0									0,6

Fuente: elaboración propia.

clasificar las canciones era solo seis. Se usó entonces este segundo modelo de clasificación para obtener la clasificación emocional del álbum (el parámetro de entrada para el modelo de clasificación fue la unión de las letras de todas las canciones del álbum).

Los experimentos se ejecutaron en un computador portátil con 8 GB de memoria RAM y procesador Core i7. La clasificación emocional de un álbum se obtuvo en menos de un minuto, tiempo

razonable para hacer análisis en línea. Los resultados se muestran en la tabla 6.

En la tabla 6 se observa que la categoría generada por los algoritmos *emoAlbumClass1* y *emoAlbumClass2* tiende a ser igual en 22 de los 24 álbumes (92 %), esto sugiere que estos álbumes tienen un estado emocional predominante, lo que se refleja en la mayoría de sus canciones. Sin embargo, también se analizan dos álbumes donde la categoría generada por estos dos algoritmos es

Tabla 6. Resultados de los experimentos

Artista	Álbum y año	Categoría emocional aplicando el algoritmo <i>emoAlbumClass1</i>	Categoría emocional aplicando el algoritmo <i>emoAlbumClass2</i>	Categoría emocional aplicando la unión de las letras de todas las canciones del álbum	Observaciones
Bon Jovi	<i>Slippery when Wet</i> [1986]	Happiness-satisfaction		Happiness-satisfaction	Los álbumes del artista tienden a ser emocionalmente alegres.
	<i>New Jersey</i> [1988]	Happiness-satisfaction		Quietness-stillness	
	<i>These Days</i> [1995]	Happiness-satisfaction		Happiness-satisfaction	
Justin Bieber	<i>Bounce</i> [2002]	Happiness-satisfaction		Quietness-stillness	Los álbumes del artista tienden a ser emocionalmente calmados y alegres en menor grado.
	<i>My World</i> [2009]	Relaxation-calmness		Quietness-stillness	
	<i>My World 2.0</i> [2010]	Quietness-stillness		Quietness-stillness	
	<i>Under The Mistletoe</i> [2011]	Quietness-stillness		Quietness-stillness	
	<i>Believe</i> [2012]	Happiness-satisfaction	Quietness-stillness	Happiness-satisfaction	
Eminem	<i>Infinite</i> [1996]	Anger-fear		Anger-fear	Los álbumes del artista tienden a ser emocionalmente agresivos.
	<i>The Marshall Mathers LP</i> [2000]	Anger-fear		Anger-fear	
	<i>The Eminem Show</i> [2002]	Anger-fear		Anger-fear	
	<i>Bad Meets Evil–Hell The Sequel</i> [2011]	Anger-fear		Anger-fear	
Michael Jackson	<i>Off the Wall</i> [1979]	Amazement-surprise		Amazement-surprise	Los álbumes del artista <i>no</i> tienden a un estado emocional específico. Se observan estados emocionales que incluyen asombro, alegría y calma.
	<i>Thriller</i> [1982]	Relaxation-calmness		Relaxation-calmness	
	<i>Bad</i> [1987]	Happiness-satisfaction		Happiness-satisfaction	
Nirvana	<i>Dangerous</i> [1991]	Amazement-surprise	Relaxation-calmness	Relaxation-calmness	Los álbumes del artista tienden a ser emocionalmente melancólicos.
	<i>Bleach</i> [1989]	Relaxation-calmness		Relaxation-calmness	
	<i>Nevermind</i> [1991]	Quietness-stillness		Quietness-stillness	
	<i>In Utero</i> [1993]	Sadness-loneliness		Sadness-loneliness	
Queen	<i>From the Muddy Banks of Wishkah</i> [1996]	Sadness-loneliness		Quietness-stillness	Los álbumes del artista tienden a ser emocionalmente alegres.
	<i>A Night at the Opera</i> [1975]	Amazement-surprise		Amazement-surprise	
	<i>A Day at the Races</i> [1976]	Happiness-satisfaction		Quietness-stillness	
	<i>News of the World</i> [1977]	Happiness-satisfaction		Happiness-satisfaction	
	<i>Innuendo</i> [1991]	Happiness-satisfaction		Happiness-satisfaction	

Fuente: elaboración propia.

diferente (celdas sombreadas en la tabla 6). Esto sugiere que la categoría emocional del álbum no es tan predominante y donde la subcategoría secundaria de sus canciones fue decisiva para la clasificación. También, en la mayoría de los casos, un artista tiende a mantener a través del tiempo la misma categoría emocional en sus álbumes, es decir, hay una *consistencia emocional* a través del tiempo en su producción discográfica.

Por otro lado, al comparar los resultados de estos dos algoritmos con la tercera alternativa (unión de las letras de todas las canciones del álbum): a) se obtuvo el mismo resultado en 17 de los 24 álbumes (70 %), b) en los dos álbumes donde no coincidió la categoría emocional generada por los algoritmos *emoAlbumClass1* y *emoAlbumClass2*, una de estas dos categorías sí coincidió con la categoría generada por la tercera alternativa, y c) se obtuvo diferente resultado en 5 de los 24 álbumes.

El hecho de registrar en un 70 % de los álbumes el mismo resultado, mediante tres estrategias, indica un alto grado de consistencia entre ellas y sugiere en la mayoría de los álbumes una tendencia emocional dominante. Para los otros álbumes (30 %) la diferente clasificación lograda se puede explicar por álbumes que no tienen una tendencia emocional dominante y por sesgos e imprecisiones inherentes a los modelos generados por los SVM.

En un segundo experimento, se seleccionaron diez artistas: AC/DC, Blink-182, Bon Jovi, Bob Marley, Britney Spears, Daft Punk, Eminem, Green Day, Metallica y Queen. De cada artista se seleccionaron ocho álbumes y de cada álbum cuatro canciones, para lo cual, se analizaron 80 álbumes y 320 canciones. Para cada artista se halló el número máximo de álbumes que pertenecen a una misma categoría emocional (se aplicó el algoritmo *emoAlbumClass1*). A este valor, expresado en porcentaje (con respecto a sus ocho álbumes), se le denominará *consistencia emocional*. La tabla 7 muestra la consistencia emocional para los artistas analizados.

Tabla 7. Consistencia emocional de los álbumes de los artistas

Cantidad de artistas	Número de álbumes en una misma categoría emocional	Consistencia emocional
2	7	87,5 %
2	6	75 %
4	5	62,5 %
1	4	50 %
1	3	37,5 %

Fuente: elaboración propia.

Los resultados indican que ocho de los diez artistas tuvieron una consistencia emocional superior al 50 %. Esto sugiere que un artista tiende a mantener en sus álbumes la misma categoría emocional a través del tiempo.

Por último, en un tercer experimento, se seleccionaron diez géneros musicales; de cada género, cuatro artistas representativos; de cada artista, tres álbumes, y de cada álbum, cuatro canciones; así, se analizaron 120 álbumes y 480 canciones. En la tabla 8 se muestran los géneros seleccionados y sus artistas respectivos.

Tabla 8. Artistas por género

Género	Artistas
Country	Blake Shelton, George Strait, Johnny Cash, Tim McGraw
Electrónica	Armin Van Buuren, Daft Punk, David Guetta, Faithless
Gospel	Deitrick Haddon, Lecrae, Mary Mary, Tamela Mann
Hip hop	2Pac, Eminem, Lil Wayne, Snoop Dogg
Metal	Black Sabbath, Iron Maiden, Judas Priest, Metallica
Pop	Britney Spears, Bruno Mars, Katy Perry, Lady Gaga
Punk	Blink-182, Green Day, The Clash, The Ramones
Reggae	Bob Marley, Jimmy Cliff, Peter Tosh, UB 40
Rock	AC/DC, Bon Jovi, Queen, Scorpions
Soul	Aretha Franklyn, Gladys Knight, Marvin Gaye, Otis Redding

Fuente: elaboración propia.

La tabla 9 muestra el número de álbumes de cada género clasificados por categoría emocional (se aplicó el algoritmo *emoAlbumClass1*).

Aunque se requieren experimentos más exhaustivos, los resultados evidenciaron algunos aspectos interesantes. Por ejemplo, en géneros como el *punk* y el *metal*, usualmente considerados agresivos y depresivos, solo la mitad de sus álbumes se clasificaron en las categorías emocionales *anger-fear* y *sadness-loneliness*. Por su parte, el género *rap*, cuyas letras usualmente conllevan crítica social y palabras fuertes, tuvo más de la mitad de sus álbumes en estas dos categorías. Por otro lado, sorprende que en el género electrónica haya tres álbumes en la categoría *anger-fear* ya que este género, por lo general, está orientado a letras alegres y “animadas”. En cuanto a los géneros *gospel* y *reggae*, más de la mitad de sus álbumes se ubicaron entre las categorías *happiness-satisfaction*, *relaxation-calmness* y *quietness-stillness*; esto concuerda con sus letras alegres, optimistas y que suelen incluir mensajes de paz y amor. En el resto de los géneros no se observó una tendencia en cuanto a la categoría emocional de sus álbumes.

CONCLUSIONES

En este artículo se propusieron dos algoritmos para clasificar un álbum en una categoría emocional. En ambos, la clasificación tuvo en cuenta la clasificación emocional de cada una de las canciones del álbum, para ello se usaron los SVM. La diferencia entre los dos algoritmos es que uno considera solo la categoría emocional principal asociada con cada canción; mientras que el otro, su categoría emocional secundaria. También se propuso una tercera estrategia para determinar la categoría emocional de un álbum, la cual considera la unión de las letras de todas las canciones del álbum.

Para la clasificación de los álbumes se tuvieron en cuenta seis categorías y para las canciones 18 subcategorías. Así, las categorías emocionales de los álbumes abarcan las subcategorías de las canciones. Esto es razonable porque, por lo general, una canción se enfoca en una emoción particular, mientras que un álbum suele ser más heterogéneo desde el punto de vista emocional. Por consiguiente, la clasificación de un álbum es una ponderación de las emociones de cada una de sus canciones. Una de las ventajas de la propuesta es

Tabla 9. Álbumes por género

Género	Categoría emocional					
	Amazement-surprise	Happiness-satisfaction	Relaxation-calmness	Quietness-stillness	Sadness-loneliness	Anger-fear
Country	0	5	4	2	1	0
Punk	4	2	0	0	2	4
Pop	3	3	2	1	2	1
Gospel	0	6	3	3	0	0
Metal	4	2	1	0	2	3
Soul	3	4	2	2	1	0
Rap	3	2	0	0	2	5
Electrónica	5	3	1	0	0	3
Rock	2	4	2	2	1	1
Reggae	2	6	2	2	0	0
Total	26	37	17	12	11	17

Fuente: elaboración propia.

que el analista puede especificar el grado (peso) con que cada subcategoría contribuye a una categoría, lo que permite introducir un elemento de subjetividad en el modelo. Para el 70 % de los álbumes analizados se obtuvo la misma categoría emocional mediante las tres estrategias, esto indica un alto grado de consistencia entre las propuestas.

Por otro lado, se analizó la consistencia emocional de los álbumes de algunos artistas; esto es, si un artista a través del tiempo mantiene la misma categoría emocional en sus álbumes. Los resultados mostraron que el 80 % de los artistas analizados mantienen una consistencia emocional superior al 50 %. También se analizó la correlación entre las categorías emocionales y algunos géneros musicales, aunque se requieren experimentos más exhaustivos, los resultados mostraron que ciertos géneros (como el *metal* y el *punk*), que tradicionalmente son asociados con ciertas emociones (ira, depresión) no necesariamente exhiben tal tendencia.

Una de las desventajas de la propuesta es que solo funciona para canciones que tengan letra, así no es posible clasificar álbumes que son parcial o totalmente instrumentales. Para abordar este aspecto se deben considerar aspectos de audio, los cuales se espera incorporar en un trabajo futuro. Esto permitiría identificar, por ejemplo, la categoría emocional de un segmento de una sinfonía y establecer su correspondencia con los *tempos* (como *adagio*, *andante* y *moderato*, entre otros). Otra desventaja es que no se consideran figuras retóricas que afectan el significado y sentido literario como la ironía, el eufemismo y la sinestesia, entre muchas otras y que son frecuentes en las letras de las canciones. Tampoco se consideran los tiempos verbales (por ejemplo, “*I was very sad but now I am very happy*”) ni negaciones (“*I won’t be sad for you*”). También, existen letras cuyo significado es ambiguo, poético o que exige un análisis detallado (por ejemplo, “*Said I loved you but I lied ‘Cause this is more than love I feel inside, Said I loved you but I was wrong ‘Cause love could never ever feel so strong*”). Estas y otras situaciones ofrecen

posibilidades de trabajos futuros con el fin de mejorar los algoritmos propuestos o proponer otros.

Otro trabajo futuro es analizar si los aspectos de audio mejoran significativamente la clasificación de las canciones que incluyen letras. También, se debe profundizar en algunos géneros y considerar sus subgéneros (para el caso del *metal* tener en cuenta subgéneros como *black*, *gothic* y *trash*, entre muchos otros) con relación a las categorías emocionales. Esto podría explicar por qué en algunos géneros se presenta tanta variedad de categorías emocionales. Se podría considerar el uso de sinónimos, antónimos, términos polisémicos, relaciones jerárquicas entre términos, entre otros. Estos aspectos sugieren el uso de ontologías que podrían enriquecer la propuesta y mejorar los resultados de la clasificación. Por último, se podrían aprovechar otras características del álbum para tratar de deducir u obtener al menos un indicio sobre su categoría emocional, por ejemplo, la portada de algunos álbumes es en algunas ocasiones sugerente (portadas de los álbumes de bandas de *metal* como Iron Maiden con su monstruo Eddie o las portadas de álbumes de *trance* que suelen incluir paisajes paradisíacos).

FINANCIAMIENTO

Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

REFERENCIAS

- Agichtein, E. & Gravano, L. (2000). Snowball: Extracting Relations from Large Plain-Text Collections. En: *Fifth ACM Conference on Digital Libraries* (pp. 85–94). Nueva York: ACM.
- Chang, C. & Lin, C. (2011). LIBSVM: A Library for Support Vector Machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology* 2(3), 1-27.
- Cherman, E.; Monard, M. y Metz, J. (2011). Multi-Label Problem Transformation Methods: A Case Study. *CLEI Electronic Journal* 14(1), 1-10.
- Diesner, J. (2006). Part of Speech Tagging for English Text Data. *Machine Learning Project Reports*, 1-8.

- Recuperado de: <http://www.cs.cmu.edu/~epxing/Class/10701-06f/project-reports/diesner.pdf>
- Feldman, R. & Sanger, J. (2007). *The Text Mining Handbook: Advanced Approaches in Analyzing Unstructured Data*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ferragina, P. & Scaiella, U. (2011). First Steps Beyond the Bag-of-Words Representation of Short Texts. *Italian Information Retrieval Workshop* (pp. 1-4). Milán: Universidad de Milán.
- Fletcher, T. (2009). Support Vector Machines Explained Acknowledgments. *The Scientific World Journal*, 1-19. Recuperado de: <http://www.tristanfletcher.co.uk/SVM%20Explained.pdf>
- Hu, X.; Downie, J. & Ehmann, A. (2009). Lyric Text Mining in Music Mood Classification. En: *10th International Society for Music Information Retrieval Conference* (pp. 411-416). Utrecht: Ismir.
- Jivani, A. (2011). A Comparative Study of Stemming Algorithms. *International Journal of Computer Technology and Applications* 2(6), 1930-1938.
- Li, T. & Ogihara, M. (2003). Detecting Emotion in Music. En: *4th international conference on music information retrieval* (pp. 239-240). Baltimore: Ismir.
- Liu, T.; Moore, A.; Gray, A. & Yang, K. (2004). An Investigation of Practical Approximate Nearest Neighbor Algorithms. En: *Proceedings of Advances in Neural Information Processing Systems*, 17. Recuperado de: <http://papers.nips.cc/paper/2666-an-investigation-of-practical-approximate-nearest-neighbor-algorithms.pdf>
- Noraida, H. & Noor, I. (2012). Porter Stemming Algorithm for Semantic Checking. En: *International Conference on Computing and Information Technology* (pp. 253-258). Amman: IEEE.
- Panagakis, Y. & Kotropoulos, C. (2011). Automatic Music Mood Classification Via Low-Rank Representation. En: *19th European Signal Processing Conference* (pp. 689-693). Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Ramos, J. (2003). Using TF-IDF to Determine Word Relevance in Document Queries. En: *First Instructional Conference on Machine Learning* (pp. 5-8). Piscataway: Rutgers University.
- Read, J.; Pfahringer, B.; Holme, G. & Frank, E. (2011). Classifier chains for multi-label classification. *Machine Learning* 85(3), 333-359.
- Roberts, A. (2002). *Automatic Acquisition of Word Classification Using Distribution Analysis of Content Words with Respect to Function Words*. Leeds: University of Leeds.
- Robertson, S. (2004). Understanding Inverse Document Frequency: On Theoretical Arguments for IDF. *Journal of Documentation* 60(5), 503-520.
- Sharma, D. (2012). Stemming Algorithms: A Comparative Study and their Analysis. *International Journal of Applied Information Systems* 4(3), 7-12.
- Trohidis, K., Tsoumakas, G., Kalliris, G., & Vlahavas, I. (2011). Multi-Label Classification of Music by Emotion. *Journal on Audio, Speech, and Music Processing* 4(1), 325-330.
- Tsoumakas, G.; Katakis, I. & Vlahavas, I. (2011). Random k-Labelsets for Multilabel Classification. *Knowledge and Data Engineering* 23(7), 1079-1089.
- Zhang, L.; Zhou, W.; Chang, P.; Liu, J.; Yan, Z.; Wang, T. & Li, F. (2012). Kernel Sparse Representation-Based Classifier. *IEEE Transactions on Signal Processing* 60(4), 1684-1695.





Desempeño ambiental de recintos habitacionales. Comparación de simulaciones, monitorización y percepción de residentes en seis viviendas de Concepción, Chile

Environmental Performance of Residential Rooms. Comparison between Simulations, Monitoring and Perception of Dwellers in Six Houses of Concepcion, Chile

Rodrigo García Alvarado¹, Rodrigo Herrera Ojeda², Cristián Muñoz Viveros³,
Gerth Wandersleben⁴

Fecha de recepción: 9 de octubre de 2014

Fecha de aceptación: 18 de septiembre de 2015

Cómo citar: García Alvarado, R., Herrera Ojeda, R., Muñoz Viveros, C., & Wandersleben, G. (2016). Desempeño ambiental de recintos habitacionales. Comparación de simulaciones, monitorización y percepción de residentes en seis viviendas de concepción, Chile. *Revista Tecnura*, 20(47), 71-84. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a06

Resumen

Los estudios y proyectos habitacionales consideran las viviendas de manera unitaria, sin diferenciar las condiciones ambientales por recintos, aunque en la vivencia cotidiana se reconocen variaciones. Este artículo realiza una comparación entre los datos proporcionados por simulaciones computacionales de desempeño térmico y monitoreos físicos de recintos, que registran valores existentes, y percepciones de sus habitantes en torno a su ambiente residencial en seis viviendas de Concepción, Chile. Con el fin de caracterizar las diferencias ambientales que surgen en los hogares, como también las originadas en los distintos recintos, en lo que es la construcción de la confortabilidad. Las simulaciones expresan algunas diferencias relevantes entre recintos (demandas energéticas anuales de 12 kW h/m² hasta 330 kW h/m²), mientras las mediciones físicas revelan

valores más acotados (diferencias entre temperaturas ambientales de menos de 5°C). Las entrevistas y observación de residentes sugieren apreciaciones similares, pero a la vez aportan otros aspectos (como una mayor valoración de los niveles superiores y habitaciones con mayor luminosidad). Los resultados y conclusiones emanados del estudio aportan datos que pueden resultar de interés comparativo para la planificación y diseño habitacional en la zona, pero también un análisis que integra las distintas dimensiones trabajadas del confort residencial y sus variaciones entre los recintos habitacionales, lo que resulta incidente para el ámbito de las políticas y acciones de mejoramiento ambiental de las viviendas, destinadas a aumentar la calidad residencial.

Palabras clave: Ambiente interior, Chile, confortabilidad ambiental, vivienda

¹ Arquitecto, doctor en Arquitectura, departamento de Diseño y Teoría de Arquitectura Universidad del Bío-Bío. Concepción, Chile. Contacto: rgarcia@ubiobio.cl

² Antropólogo, doctor en Antropología Social y Cultural, académico Carrera Antropología Universidad de Concepción. Concepción, Chile. Contacto: rherrerao@udec.cl

³ Arquitecto, magíster en Hábitat Sustentable y Eficiencia Energética, docente de la Escuela de Arquitectura e Investigador del Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción CITEC Universidad del Bío-Bío. Concepción, Chile. Contacto: chilecmunoz@ubiobio.cl

⁴ Arquitecto, docente de la Escuela de Arquitectura Universidad del Bío-Bío. Concepción, Chile. Contacto: gerthwvm@ubiobio.cl

Abstract

The housing studies and design regards homes like one indoor environment, without recognizing differences between rooms, although in the daily living it perceives variations. This article presents a comparison between data from computer simulations of thermal performance and physical monitoring that records existing values of rooms, with perceptions of its inhabitants around their residential environment, from six houses located in Concepción, Chile. In order to characterize environmental differences that arise in homes, as well as those originated in different rooms, which represents comfort building. Simulations express some significant differences by venues (annual energy demands from 12 kWh/m² to

330 kWh/m²), while physical measurements reveal more limited values (differences between environmental temperatures less than 5°C). Interviews and observation of residents suggest nearby considerations, but also provide other aspects (like higher value of upper story and rooms with high luminance). The outcomes and conclusions of the study provide data that can be of comparative interest for housing planning and design, but also an analysis that integrates the diverse studied dimensions, which is incident to environmental policies and actions improving housing, targeted to increase the residential quality.

Keywords: Chile, comfort, energy simulation, environment, housing, indoor.

INTRODUCCIÓN

El creciente consumo energético residencial está motivando estudios ambientales de las viviendas para reducir la demanda de combustibles y mejorar las condiciones de clima interior, especialmente en cuanto a los niveles de confort térmico. Estos análisis utilizan con frecuencia simulaciones térmicas de los edificios (Krygiel y Nies, 2008; Hensen y Lambert, 2011; Jankovic, 2012; Anderson, 2014), que consideran resultados del total del ambiente interior, sin diferenciar los distintos recintos, en especial en los edificios de tamaño pequeño, como las viviendas unifamiliares, que poseen varias habitaciones, simplificándolas en modelos unizona (Hendron y Engebretch, 2010). Sin embargo, cuando se realizan mediciones de variables ambientales, como temperatura, humedad, iluminación o calidad del aire, suelen evidenciarse diferencias entre habitaciones (Sarmiento y Hormazábal, 2003; León, Muñoz, León y Bustamante, 2011; Beizae, Lomas y Firt, 2013). También las consultas sobre confort térmico a los usuarios indican variaciones de percepción relativas al interior de las viviendas (Peeters, Dear, Hensen y D'Haeseleer, 2009), y la experiencia cotidiana revela cambios

en la situación térmica o lumínica entre recintos (Smith, 2012), en particular en viviendas aisladas y localizadas en climas de mayor oscilación térmica. También, Chiou (2009) registró que el control diferenciado de los espacios interiores puede permitir sustanciales ahorros energéticos.

En Chile, se han realizado varias revisiones ambientales en viviendas (como los estudios de Ambiente Consultores, 2007; Bustamante, 2009; Centro de Desarrollo Tecnológico, 2010; Fissore, 2012) que revelan condiciones interiores deficientes y altas demandas energéticas, según las distintas zonas climáticas del país, aunque sin diferenciar resultados acerca de los recintos interiores de las unidades habitacionales.

Por ejemplo, para viviendas unifamiliares en la ciudad de Concepción, principal centro urbano del sur del país, los estudios previamente mencionados indican requerimientos térmicos sobre los 100 kW h/m², principalmente debidos a calefacción en invierno.

Esta ciudad se encuentra localizada en los 36°46'22" de latitud sur y 73°03'47" de longitud oeste, y posee un clima templado-húmedo (figura 1), con estaciones marcadas con temperaturas de 11 °C a 22 °C en verano, y de 6 °C a 13 °C en

invierno, 70 % de humedad relativa, precipitaciones cercanas a los 1.110 mm anuales e irradiación global media diaria de 1,8 a 6,6 kW h/m². El área urbana de Concepción aloja aproximadamente un millón de habitantes, en unas 250.000 viviendas, que en un 85 % son aisladas o adosadas, en uno o dos pisos, combinando albañilería y estructura de madera (Cámara Chilena de la Construcción, 2011). Desde el año 2000 se consideran en el país reglamentos de transmitancia térmica para la techumbre, y desde 2007 para la envolvente general de las viviendas, y actualmente se aplican programas de rehabilitación y calificación energética. Sin embargo, estos consideran un análisis global de la edificación, y un confort interior homogéneo que escasamente se alcanza.

Las condiciones de confort térmico son determinadas habitualmente según un estándar similar en todas las zonas climáticas, tipologías constructivas y recintos (Fanger, 1973); a partir del cual se determinan los requerimientos energéticos de los edificios. Sin embargo, una caracterización por recinto permitiría focalizar los esfuerzos de reacondicionamiento constructivo en aquellas habitaciones donde se pueda generar mayor reducción sobre la demanda de energía. También, el modelo

estándar de confort global ha sido discutido reconociendo las diferencias culturales y geográficas de la población (Gómez-Aspeitia, Bojórquez y Ruiz, 2007). Igualmente se han advertido condiciones del propio edificio y de la ocupación de los espacios que influyen en la sensación ambiental (Elzeyadi, 2009; Frontczak, 2011), pero no han sido cabalmente definidos. En este artículo se pretende caracterizar las diferencias interiores ambientales entre habitaciones en viviendas unifamiliares a través de la comparación de simulaciones, monitoreos y percepción de residentes en seis casos localizados en Concepción, Chile. En la primera parte del texto se describe el registro realizado y sus resultados generales; en la segunda parte, de acuerdo con los valores obtenidos se analizan características arquitectónicas de los recintos, para identificar condiciones de los recintos que permitan orientar los estudios y acciones de mejoramiento ambiental en las viviendas.

METODOLOGÍA

Se privilegió el uso simultáneo de técnicas que recopilaran información de carácter cuantitativo y cualitativo, para después generar resultados

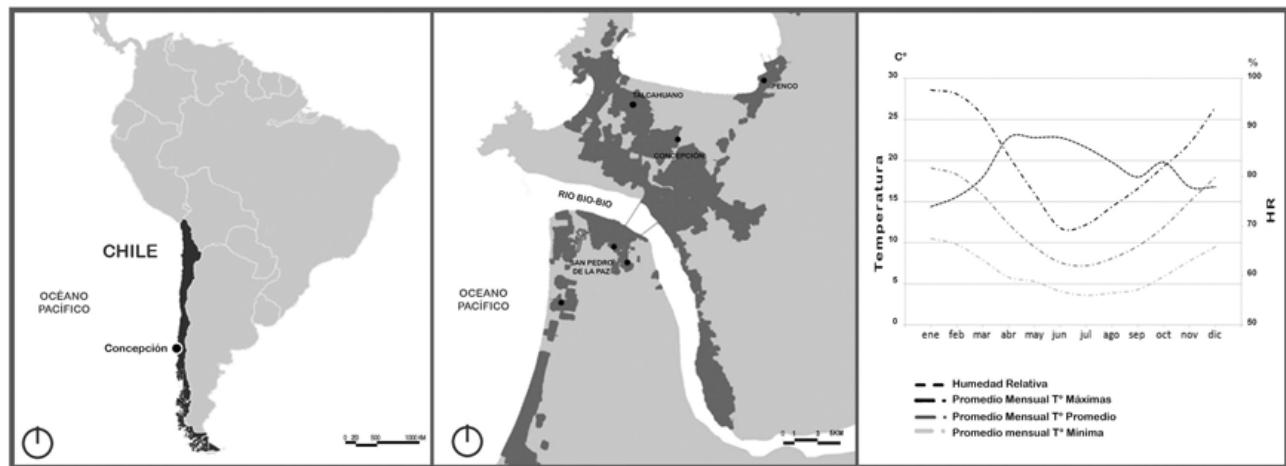


Figura 1. Localización, área urbana (de los casos) y clima de Concepción

Fuente: elaboración propia.

a través del cruce de los datos indagados. En el caso de la aplicación de simulaciones computacionales, el objetivo era proyectar escenarios de desempeño térmico de las viviendas, revisando diferencias entre los diferentes recintos que las componen. Los monitoreos físicos tenían por objetivo buscar valores reales de comportamiento en las distintas viviendas y habitaciones, en periodos específicos. Por último, las visitas intensivas buscaban dar cuenta de los usos y percepciones que los respectivos ocupantes otorgaban al hogar y a sus diferentes ambientes. El cruce de la información recopilada a través de estas tres técnicas permitió un análisis integral que permitió llegar a características de los recintos que permiten aportar al mejoramiento de las viviendas, integrando la perspectiva de su ocupación, su materialidad y las demandas energéticas requeridas.

Las viviendas analizadas corresponden a la tipología habitacional unifamiliar, predominante en distintas ubicaciones del área metropolitana de Concepción (figura 2), que alojan a más del 70 % de la población (cerca de 600.000 habitantes). Se seleccionaron viviendas mayores a la media de

superficie registrada en la zona (60 m²) para revisar ejemplos con variedad de recintos que además ilustran el desarrollo inmobiliario local y que generan los más altos consumos energéticos. Los casos estudiados fueron elegidos de una muestra convocada entre estudiantes universitarios, quienes revisaron sus propias residencias o de parientes, quienes se seleccionaron según la diversidad de su estructura familiar y disponibilidad de los usuarios a participar en el ejercicio. En cada vivienda se realizó primero una recopilación de características constructivas, equipamiento y ocupación. Luego, se elaboraron simulaciones computacionales de desempeño térmico, con una modelación zonificada por recintos, efectuando un cálculo dinámico (hora a hora) que permitió obtener resultados de demanda energética mensuales y anuales según un nivel de confort térmico dado. En las monitorizaciones físicas se registraron valores de calidad del aire, iluminación, temperatura y humedad relativa, exterior e interior, en cuatro habitaciones (con sensores superficiales y de aire), durante una semana de verano y otra de invierno. Además, se realizaron ensayos y determinaciones



Figura 2. Fotos de las viviendas estudiadas

Fuente: elaboración propia

de características físicas y comportamiento de la envolvente in situ de termoflujometrías, termografías, mediciones de infiltración de aire y consumo eléctrico por demanda de calefacción. En las consultas se efectuaron encuestas de percepción térmica normalizadas, entrevistas y visitas de un día completo de duración en dos periodos, con observaciones de las actividades y preguntas abiertas sobre experiencias y preferencias de uso de los espacios a todos los adultos de cada vivienda. Estas revisiones fueron realizadas por distintos profesionales, elaborando informes resumidos y analizados por el grupo de investigadores.

De los seis casos revisados (tabla 1), cinco son viviendas de dos pisos y una de tres, en volúmenes independientes, parcialmente adjuntas a construcciones vecinas y emplazadas en la parte central de sitios rectangulares de zonas residenciales. Todas están habitadas por un grupo familiar permanente, y edificadas con un primer piso de albañilería confinada (con valores de transmitancia térmica U) de 1,7 a 2,4 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$) y pisos superiores de entramado de madera con aislación (con valores U de 0,8 a 1,4 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$). Tres de las viviendas son recientes (con menos de tres años de construcción), y ocupadas por familias jóvenes con niños pequeños. Las otras tres fueron construidas hace varias décadas, poseen mayor dimensión por ampliaciones y alojan residentes de más edad. Todas las viviendas

presentan una organización espacial similar: en el primer piso se localizan uno o más recintos de estar y comedor, habitualmente integrados (sin muros divisorios), con circulaciones laterales y escalera, además de cocina y algunos dormitorios y baños separados; y en el segundo piso se presentan varios dormitorios y baños en torno a un vestíbulo. Los recintos son ortogonales y de tamaños similares (excepto baños y pasillos más reducidos), dispuestos en una configuración rectangular de bordes variados (figura 3).

Simulaciones

Se realizaron simulaciones de comportamiento térmico de los seis casos, con el *software Autodesk Ecotect Analysis*, y con *DesignBuilder* (usando EnergyPlus como motor de cálculo). Para analizar las diferencias interiores se definieron zonas por recintos, comparando resultados obtenidos con Ecotect ya que es más consistente en la definición de zonas. En Ecotect los recintos se definen por volúmenes independientes que comparten muros o pisos, mientras que en *DesignBuilder* se subdivide un volumen global, lo que limita la modificación y análisis de zonas. En los dos programas se indica la configuración de vanos (puertas y ventanas), y propiedades termofísicas de los materiales (densidad, conductividad y calor específico), además

Tabla 1. Casos analizados

	A	B	C	D	E	F
Superficie total (m ²)	79,47	91,97	118,8	135,60	170,00	207,16
Año de ejecución	2011	2010	2010	1957	1940	1988
Cantidad de niveles	2	3	2	2	2	2
Cantidad de ocupantes	2 adultos + 2 niños	2 adultos + 2 niños	2 adultos + 2 niños	2 ad. may. + 3 adultos	4 adultos	2 adultos mayores
Cantidad de zonas	12	14	17	10	15	23
Gasto en calefacción (kW h/año)	8.205	6.368	7.338	4.418	5.511	18.243
Demanda de Calefacción (kW h/año)	5.883	6.115	7.806	18.113	8.283	17.311
Por m ² (kW h/año)	74	66	66	134	49	80

Fuente: elaboración propia



Figura 3. Plantas de las viviendas

Fuente: elaboración propia

del espesor y detalle constructivo, para calcular la transmitancia térmica (valor U). Además, se indicaron las funciones y calendarios de ocupación por recinto, ganancias internas, equipos de calefacción y eficiencia. Se estableció una renovación de aire similar para todos los casos equivalente a 1,5 ACH, correspondiente a la media de esta tipología en la zona (Figuerola *et al.*, 2013). Se estableció una base climática según la localización (IWECC), orientación solar y condiciones generales del entorno. Por último, se definió una banda de confort de 18 °C a 25 °C según cálculo basado en el confort adaptativo para la localidad en estudio (basado en ASHRAE 55).

Monitorizaciones

A través de las mediciones físicas se busca obtener valores del comportamiento de los elementos constructivos y las condiciones ambientales en

periodos específicos, mediante el uso de instrumental (tabla 2). Para el monitoreo de temperaturas (del aire y superficiales), humedad relativa del aire, concentración de CO_2 e iluminación, se seleccionó el instrumento HOBO U26-001 (registrador de oxígeno disuelto), por su confiabilidad y capacidad para recoger datos en espacios habitados. En termoflujometría (flujos de calor por paramentos verticales exteriores) se recurrió a un equipo compuesto por termocuplas y un microvoltímetro, con el método definido por la norma ASTM C 1046. Para las imágenes infrarrojas de valor térmico de superficies, o termografías, se utilizó una cámara termográfica Fluke y el procedimiento de mediciones se hizo según la norma ISO 6781:1883 modificada. La magnitud de infiltración de aire en las viviendas se midió por presurización con ventilador ubicado en las puertas de acceso (*test blower-door*), según norma UNE13728:2003.

Tabla 2. Mediciones realizadas

Exigencia/Desempeño	Parámetros/Indicador	Técnica /Procedimiento
Demanda energética Aislación térmica Hermeticidad	Energía, E (kWh)	Monitorización eléctrica según protocolo definido con equipo HOBO Data-Logger UX120-017 entradas de pulsos 512 kb de memoria
	Transmitancia Térmica, U (W/m ² °C)	Determinación de termoflujometría in situ según ASTM C 1046
	Cambios de aire (ACH) a 50 Pa (1/h)	Determinación de hermeticidad mediante presurización por medio de ventilador (test blower door) según UNE13728:2003
Calidad del aire	Concentración de CO ₂ , C (ppm)	Monitorización de concentraciones de CO ₂ según protocolo con Equipo HOBO UNI-K30
Confort higrotérmico	Temperatura del aire, Ta (°C)	Monitorización higrotérmica según protocolo definido con: Equipo HOBO Data Logger U12-013, 2 salidas análogas Ta/HR
	Temperatura superficial exterior, Tse (°C)	Equipo HOBO Data Logger TMC6-HE: Sensor de Temperatura de pared o tubería
	Temperatura superficial interior, Tsi (°C)	Equipo HOBO Data Logger TMC6-HE: sensor de temperatura de pared o tubería
	Humedad relativa del aire, HR (%)	Monitorización higrotérmica según protocolo definido con: equipo HOBO Data Logger U12-013, 2 salidas análogas Ta/HR
Confort lumínico	Niveles de iluminancia, I (Lux)	Monitorización de iluminancia según protocolo definido con equipo HOBO Data Logger U12-012
Termografía. Condición térmica de la superficie. Emisiones infrarrojas. Detección de puentes térmicos.	Temperatura superficial interior y exterior a través de imagen infrarroja	Cámara Fluke, modelo Ti25. Técnica y protocolo desarrollado por Citec en base a norma ISO 6781:1883 modificada.

Fuente: elaboración propia

Para implementar el procedimiento de instalación de equipos, tiempos de medición y calibración de equipos, se definió, en una primera instancia, un protocolo de trabajo (experimentado en la vivienda de uno de los investigadores), que permitió programar mediciones de verano entre diciembre de 2012 y enero de 2013, y posteriormente de invierno, entre julio y agosto de 2013. El trabajo se orientó a estudiar relaciones de interés entre las variables físicas del desempeño energético y ambiental de las viviendas (temperaturas, humedad y calidad del aire interior principalmente), las variables constructivas propias del diseño (materialidad, aislación e inercia térmica, orientación y ubicación de los recintos, agrupamiento, etc.) y las condiciones de ocupación. Los datos recopilados en cada periodo fueron extraídos de los

sensores y traspasados a gráficos y tablas para su evaluación.

Visitas

Para analizar la percepción de los residentes se utilizaron distintos procedimientos. Primero, una consulta para un registro global de información relevante a los estudiantes relacionados con los casos. Luego se realizó una encuesta de satisfacción térmica según método Fanger (Fanger, 1973) que reconoce la norma de confort ISO 7730. Posteriormente se efectuaron visitas focalizadas, siguiendo una adaptación de la técnica cualitativa del *shadowing* (Jirón, 2011). Este procedimiento implicó acompañar a los residentes adultos durante un día, observando y registrando sus actividades

domésticas, en diálogo con ellos para conocer la vivencia corporal, tanto como las expectativas implicadas en la construcción simbólica de los espacios domésticos. El estudio pretendía dar cuenta del tiempo y lugar de las actividades cotidianas, pero también ayudar a resolver interrogantes como: ¿Tendrán significados específicos los dormitorios, la cocina, el comedor? O, ¿cómo se construyen y exteriorizan las valoraciones otorgadas a los distintos recintos dentro del hogar? Ello, asumiendo que la confortabilidad ambiental se escenifica por medio de la determinación de patrones de uso cotidiano de los distintos recintos, y su funcionalización orientada para acoger diferentes formas de apropiación. Este proceso consideró asumir la técnica en su doble intencionalidad: como actividad/metodología que fortalecía un acercamiento visual; y, por otra, apelando a un nivel discursivo al pedirle a los residentes que detallaran el uso de los espacios, los significados y condiciones de cada uno (Jirón, 2011). La apropiación física y simbólica de los espacios domésticos surge así en su versión concreta del uso, pero también en los discursos elaborados que los cualifican y ubican como partes de un conjunto mayor.

La encuesta según el método Fanger se aplicó en diciembre de 2012 a dos ocupantes adultos de cada una de las viviendas, en horario de mediodía con una temperatura media de 22,62 °C con 60,7 % de humedad relativa, es decir dentro del rango de confort considerado. Se les entrevistó en el recinto de estar, en los que los encuestados portaban ropa ligera, entregando para todos los casos un resultado de satisfacción térmica (voto medio estimado –PMV– = 0 y personas previstas en discomfort –PMD– = 0,5). Sin embargo, en las respuestas se advierten tendencias diferentes en los hombres respecto a las mujeres, y las personas mayores revelan sentirse más satisfechas. En las entrevistas expresaron también condiciones de sensación térmica distintas según sectores de la casa y estaciones del año, sobre todo en relación a los niveles de la casa y por el uso de calefacción en invierno, estableciéndose que no lograban una satisfacción completa.

Las visitas se realizaron entre abril y junio de 2013, con una recopilación general de actividades y percepciones domésticas. Y luego, en agosto de 2013 se utilizó una pauta más específica de consultas sobre recintos e intereses, para lo cual se indagó sobre la historia familiar; apreciaciones de viviendas anteriores utilizadas; del entorno; comportamiento ambiental, y expectativas futuras.

RESULTADOS

Las simulaciones, monitoreos y estudios de percepción en las viviendas estudiadas presentan algunos resultados coincidentes por recintos, aspectos que podrían ser relevantes en el diseño residencial.

Las visitas advirtieron una situación semejante en todas las viviendas, con rutinas de ocupación definidas por la edad, condición laboral y rol dentro del grupo familiar, con variaciones ocasionales y modificaciones de residentes entre un año y otro, lo que hablaría de una movilidad interna a considerar. El hallazgo más relevante es que, a despecho de las condiciones térmicas o ambientales, la comodidad se advierte ligada a la independencia espacial; esto es, el aislamiento físico, auditivo y visual. Así, se reconoce la importancia de una privacidad colectiva, pero más aún, la de una individual. Por su parte, las condiciones térmicas o ambientales se perciben como aspectos de importancia secundaria y se reducen a aspectos de asoleamiento y calefacción. Si bien los residentes declaran apreciar la recepción directa de sol en algunas habitaciones, ello no necesariamente redundaría en su utilización explícita, aunque sí se advierte en la funcionalización de los diferentes recintos, su iluminación y climatización. Asimismo, se reconoce una diferenciación térmica entre los niveles (por lo general más confortable el segundo nivel, aunque variable en el verano), la cual se asocia, no obstante, a una asumida mayor privacidad de los recintos de dormitorio que permitirían disfrutar aquella idoneidad.

En este mismo sentido se aplica el gasto en climatización, delegados sobre todo a equipos

centrales de calefacción (en su mayoría a leña), y cuya gestión se organiza y distribuye entre el conjunto de los integrantes de la familia. Aquí se observa que ellos están orientados a otorgar buenas condiciones ambientales a los menores de edad, aunque también se muestran limitados para climatizar en términos ideales (debido a sus costos), lo que lleva al uso de pequeños calefactores móviles (eléctricos o a gas), en algunos recintos y periodos. La dimensión, materialidad o localización de los recintos no es reconocida por los residentes. Se utilizan escasamente las habitaciones pequeñas, menos iluminadas o más operativas (como las cocinas), pero también se valoran. Se aprecia el encuentro colectivo, pero se reconoce una vivencia crecientemente individualizada, con expectativas de una mayor permanencia personal, y controlada en los aspectos colectivos, en ámbitos cómodos y en relación con el exterior.

En las simulaciones, la mayor demanda energética es por calefacción en invierno (mayo-octubre), con bajos requerimientos de climatización en verano. Las necesidades de iluminación artificial, equipos domésticos y agua caliente sanitaria, permanecen más estables durante todo el año, con magnitudes aproximadas a los 300 kW h mensuales por vivienda, equivalentes a los registrados en los casos, mientras las demandas de calefacción varían de 6.000 a 18.000 kWh anuales, lo que dividido por la unidad de superficie corresponde de 49 a 134 kW h/m², similar a las magnitudes obtenidas en otros análisis (Ambiente Consultores, 2007; Bustamante, 2009; CDT, 2010), aunque utilizando otros modelos, consideraciones y programas. Las demandas varían por el mayor tamaño de las viviendas como por sus condiciones constructivas. Estas magnitudes son similares a los consumos reales medidos en las viviendas por conceptos de calefacción, en gastos anuales de electricidad, gas, parafina o leña según la eficiencia estimada y poder calorífico (tabla 1), lo que permite reconocer que las simulaciones se aproximan a las situaciones reales al utilizar los parámetros establecidos para los modelos.

Al revisar los resultados por zonas térmicas (recintos) se advierten diferencias de demanda energética y condiciones ambientales. Ponderadas por la superficie, los valores de las distintas habitaciones en cada vivienda varían desde 12 kW h/m² hasta 330 kW h/m², en especial en las viviendas de mayor superficie construida (E y F). Estas diferencias se atribuyen a los diferentes estándares de calidad de las construcciones y la diversidad de los programas arquitectónicos. Es decir, según se observa en las simulaciones, se aprecian sectores de las viviendas con un desempeño natural adecuado durante todo el año (que prácticamente no requieren calefacción), mientras otros recintos presentan condiciones que demandan un alto consumo energético para alcanzar el rango de confort térmico definido.

El proceso de monitoreo evidencia que se alcanzan condiciones de confort solamente en periodos parciales del día, más extensos en verano, y de menor duración en invierno, con algunas mediciones específicas fuera de los rangos recomendables, por ejemplo en concentración de CO₂ (sobre 1000 ppm) e iluminación. En el segundo nivel de las viviendas las temperaturas superficiales interiores presentaron una oscilación más moderada, ya que sus paramentos poseen menor transmitancia térmica. Las temperaturas del aire interior presentaron valores superiores por influencia de la ocupación y equipamiento, así como por estabilidad térmica, con una variabilidad similar pero con diferencias de hasta 5 °C entre recintos, evidenciando además desfases temporales. La humedad relativa presentó una menor oscilación respecto al exterior, pero también en magnitudes distintas entre habitaciones (en especial la cocina).

Las mediciones de flujometría confirmaron valores de transmitancia térmica consideradas en las simulaciones, lo que reconoce una adecuada ejecución de los elementos constructivos. Las termografías presentaron condiciones regulares de los paramentos, con algunos puentes térmicos en singularidades típicas de la construcción liviana asociada a los segundos pisos, o ampliaciones donde

la estructura acusa la falta de material aislante o su discontinuidad. Las presurizaciones de aire presentaron un amplio rango de cambios de aire por hora (de 6 a 12 ACH a 50 Pascales), pero consistentes con registros nacionales (Figueroa *et al.*, 2013).

Las condiciones monitoreadas expresan situaciones habitacionales regulares, con carencias fundamentalmente en confort térmico de invierno (a pesar de la utilización de calefacción) y con altas infiltraciones de aire. Pero más aún, se reconocen diferencias en las mediciones por recintos, de acuerdo con su orientación solar, con incrementos de iluminación, temperatura y descensos de humedad, pero también variaciones producto de distintas condiciones de masa de la envolvente.

A continuación se analizan desempeños ambientales de recintos de distintas características arquitectónicas a partir de estos aspectos y basándonos en los tres criterios analíticos ya mencionados:

Superficie expuesta

Las simulaciones presentan diferencias similares de demanda por recintos, en que emerge como factor determinante la cantidad de superficie vertical (muros) expuesta al exterior. Las habitaciones con menos de 10 m² al exterior poseen una media, en todos los casos analizados, de 116 kW h/m² de demanda anual para calefacción, mientras las habitaciones con más de 15 m² expuestos presentan una de 141 kW h/m². Es decir, los recintos localizados al centro de cada vivienda (con pocas caras hacia el exterior) requieren casi la mitad de energía para permanecer dentro del rango de confort en comparación con las habitaciones dispuestas en las esquinas expuestas de las viviendas. Esto se origina por la alta transmitancia térmica de la envolvente, que puede pensarse como posible de mitigar con mayor aislación en los muros, además de volúmenes más compactos, tal como ya han sugerido otras investigaciones (Bustamante, 2009; CDT, 2010). En la misma línea, las simulaciones indican que la demanda

es mayor en las viviendas más irregulares y extendidas (A, D, E), al generar habitaciones con mayor superficie expuesta.

En los monitoreos se efectuaron mediciones en cuatro recintos por vivienda en periodos limitados (una semana), por lo que es difícil proyectar desempeños generales. Sin embargo en algunos recintos con mayor exposición al exterior (dos o tres caras) se registraron temperaturas más bajas y más oscilantes, como también mayores porcentajes de humedad y CO₂, (presumiblemente por mayor ocupación), así como de iluminación natural (ya que poseen ventanas mayores).

Según las observaciones, los residentes no valoran como aspecto determinante la magnitud de exposición de los recintos, ni tampoco que presenten un desempeño deficiente. Al contrario, la mayor disposición de ventanas que aportan mayor iluminación natural es un atributo evaluado positivamente, aunque ello esté en entredicho con la incidencia de menos en términos de temperatura y oscilación térmica que derivaría de la mayor superficie expuesta al exterior. Esta valoración es persistente como apreciación global, aunque no necesariamente incidente en una mayor o menor ocupación de los recintos.

Orientación

La posición de los recintos para recibir sol es la segunda diferencia más notoria que se desprende del análisis de las simulaciones. Las habitaciones con una cara al norte presentan una demanda anual media de 146 kW h/m², mientras que los recintos con caras al este/oeste o sur presentan 171 kW h/m², debido a la ganancia térmica por ventanas, como también en muros opacos. No obstante, hay una diferencia escasa o inversa en algunas viviendas (A y B) que poseen más frentes soleados.

De los monitoreos, se desprende que los recintos al sur presentan temperaturas más bajas, mientras que las de otros, al norte, son más altas, aunque también muestran una mayor oscilación térmica.

Los ocupantes reconocen el asoleamiento como un factor relevante, asociado a una sensación de bienestar y calidez, aunque se asume que es un elemento no proyectable al conjunto de la vivienda ni posible de controlar en su totalidad.

Localización vertical

Los recintos ubicados en el primer nivel presentan una demanda anual media más alta (161 kW h/m²) que los localizados en el segundo nivel o superior (135 kW h/m²). Una primera hipótesis al respecto sugiere que se debe tanto a la mayor transmitancia térmica de la envolvente en el piso inferior, como al flujo térmico generado por los espacios verticales de comunicación (escaleras). De hecho, casi como reafirmando tal sugerencia, los casos B y F que poseen en el segundo piso paramentos con mayor transmitancia (menos aislación térmica) y escaleras más reducidas, tienen demandas similares o invertidas entre ambos niveles. Pero los datos obtenidos aún no permiten proyectar la hipótesis como concluyente, al no contarse con un número mayor de registros comparativos con los que contrastar la información.

De los monitoreos se advierte que los recintos inferiores presentan desempeños más bajos, mientras que los superiores registran un mejor comportamiento, si bien éstas presentan mayor humedad, CO₂ e iluminación por su utilización.

Los residentes reconocen un mejor comportamiento térmico en los niveles superiores, tanto en sus expresiones verbales, como en el registro de mayor frecuencia de uso. Sin embargo, también reconocen el aporte simbólico y funcional de las habitaciones ubicadas en niveles inferiores, y muestran patrones de utilización más específicos y delimitados.

Tamaño

Los recintos con menor superficie horizontal (menos de 8 m²) presentan en las simulaciones una demanda anual media de 168 kW h/m², mientras

que las habitaciones mayores presentan un comportamiento levemente mejor con 152 kW h/m². Esta diferencia puede originarse por la mayor relación de área envolvente, lo que incrementaría las transferencias internas de calor por oscilaciones climáticas. En las viviendas pequeñas (A y B), estas diferencias se reducen debido a la similitud de tamaño en los recintos.

En los monitoreos físicos no se midieron habitaciones menores dado que se buscaron recintos representativos y comparables entre los diferentes casos.

En los ocupantes se reconoce una apreciación inversa, ya que se asocia un desempeño más bajo a las habitaciones grandes, lo que es atribuible al tiempo requerido para calefaccionar y, por ende, para alcanzar el rango de confort.

Función

Las habitaciones que alojan el mismo uso (comedor, estar, cocina, dormitorios, baños) presentan diferencias similares de demanda según las simulaciones. El mejor desempeño se da en espacios de distribución (113 kW h/m²), tal vez por su posición central; y el peor en las cajas de escalera (322 kW h/m²), eventualmente por su mayor relación de área envolvente, pero esto debe revisarse de manera más detallada. A su vez, los baños y dormitorios presentan mejor comportamiento (136 y 155 kW h/m², respectivamente) que los comedores y recintos de estar (179 y 195 kW h/m²), siendo intermedios las cocinas (167 kW h/m²). Estas diferencias están influenciadas por su dimensión y localización interna. Las viviendas más grandes (D, E y F) tienen mayores diferencias entre habitaciones de distinto uso dado por la variedad de configuración de los recintos.

En los monitoreos se advierten diferencias similares, pero en la percepción de los residentes se reconocen desempeños inferiores en los baños, cocinas y circulaciones. Por otro lado, los dormitorios y recintos de estar se reconocen como de mejor comportamiento, debido, tal vez, a la

utilización de equipos de calefacción, ya que estos están en funcionamiento permanente.

CONCLUSIONES

Este trabajo expone una revisión del desempeño ambiental de viviendas de una misma zona climática, analizadas a partir de tres fuentes de recopilación de datos, diferenciados por recintos. Aunque pueden advertirse limitaciones en los procesos de medición, es posible reconocer características de las habitaciones que inciden en el confort interior.

En términos generales, las simulaciones indican demandas térmicas con resultados muy distintos por recintos, parcialmente consistentes entre casos y con algunas características comunes a tener en cuenta. Por su parte, las monitorizaciones entregan valores ambientales diferentes entre algunas habitaciones, pero por periodos breves. Por último, las entrevistas y observación de ocupación de los residentes expresan percepciones variables por sectores que son cercanas, o medianamente coherentes, con las simulaciones y monitoreos. De acuerdo con estos resultados, se puede afirmar que el estudio identifica condiciones arquitectónicas de recintos, que afectan el desempeño ambiental y consumo energético, que deben considerarse en los nuevos diseños y rehabilitaciones de viviendas existentes para asegurar una mejor calidad residencial.

Respecto a las características de las habitaciones, se desprende de las simulaciones que los recintos con menor cantidad de superficie expuesta al exterior presentan una demanda térmica más baja. Por tanto, siguiendo esta pauta, los proyectos de viviendas en una zona climática similar podrían considerar una área reducida de envolvente (o sea, volúmenes compactos), y ubicar las habitaciones más utilizadas en la parte central de la casa. En la modificación de construcciones existentes se deberían examinar ampliaciones que completen las formas (para evitar aumentar la superficie total expuesta) y privilegiar el mejoramiento térmico de las envolventes perimetrales, promoviendo así los

frentes y habitaciones hacia el costado más soleado, que fue la segunda característica que otorgó menor demanda térmica. Y que también es reconocida en las monitorizaciones y apreciada por los residentes.

Así mismo, se advierte cruzando la información recopilada que existe una menor demanda y mayor valoración de los niveles superiores de las viviendas, junto con la preferencia por habitaciones con mayor luminosidad. Para promover estas condiciones en el diseño o rehabilitación de viviendas la opción pasaría por extender el volumen, aunque ello significaría contravenir la compacidad recomendada a partir de las simulaciones. Una alternativa apuntaría a considerar ajustes particulares, desarrollando algunos recintos con mayor relación al exterior y envolvente de baja transmitancia.

En el caso del tamaño y función de los recintos, advertimos que se relacionan levemente con la demanda térmica y dependen de la organización espacial de las viviendas, por tanto no sugieren ajustes relevantes. Sin embargo, parece recomendable separar sectores de ocupación más ocasionales, incrementando la aislación perimetral y promoviendo iluminación natural para la habitabilidad.

Completando esta reflexión se puede considerar que las diferencias entre recintos en las viviendas revelan fundamentalmente un desempeño heterogéneo de la habitabilidad doméstica. La envolvente general modera las inclemencias climáticas, pero se advierten variaciones interiores que requieren esfuerzos en calefacción central, y en algunos periodos, aportes especiales en algunos recintos expuestos. Esto expresa una situación de confort diferenciado, con condiciones básicas para toda la vivienda, pero con lugares privilegiados que se relacionan con el exterior. Esta diversidad ya ha sido sugerida en otras investigaciones recientes (Frontzack, 2011), y deberían considerarse en los estudios residenciales.

Teniendo en cuenta los hallazgos de este estudio, se recomienda realizar análisis más exhaustivos y comparativos entre los distintos recintos

que componen las viviendas. El tratamiento más especializado de este aspecto indica que se pueden promover importantes mejoras en el confort doméstico, además de una atenuación sustancial del impacto energético, lo que permite a su vez una disminución de los gastos domésticos. En este sentido, una mayor profundización de lo realizado, con una mayor cantidad de casos para analizar, permitiría fomentar un desarrollo residencial con mejor desempeño ambiental y habitabilidad. Porque, en definitiva, esta investigación muestra que de la revisión detallada de los supuestos de confort ambiental residencial (analizados en las diferenciaciones espaciales y temporales de recintos y formas de ocupación), surgen aspectos que son importantes para determinar acciones de mayor impacto sobre la calidad interior residencial y demanda energética asociada.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo ha recibido financiamiento del proyecto de investigación Fondecyt 1120165 del Gobierno de Chile, y se agradece la participación de colaboradores y residentes de las viviendas analizadas.

REFERENCIAS

- Ambiente Consultores (2007). *Programa de inversión pública para fomentar el reacondicionamiento térmico del parque construido de viviendas*. Santiago: Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- Anderson, K. (2014). *Design Energy Simulation for Architects*. Nueva York: Routledge.
- Beizaee, A.; Lomas, K. & Firt, S. (2013). National Survey of Summertime Temperatures and Overheating Risk in English Homes. *Building and Environment* 65(1), 1-17.
- Bustamante, W. (2009). *Guía de diseño para la eficiencia energética de la vivienda social*. Santiago: Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- Cámara Chilena de la Construcción (2011). *Balance de la Vivienda en Chile*. Santiago.
- Centro de Desarrollo Tecnológico (CDT) (2010). *Estudio de usos finales y curva de oferta de conservación de la energía en el sector residencial. Estudio final y resumen ejecutivo*. Santiago: Cámara Chilena de la Construcción.
- Chiou, Y. (2009). *An Occupant-Driven Integrative Household System Form Residential Building Energy Simulation*. Recuperado el 20 abril de 2014, de: <http://www.cmu.edu>: http://www.cmu.edu/architecture/research/grad_work/2009_phdbpd_chiou_yunshang.pdf
- Elzeyadi, I. (22-24 de junio de 2009). *Architectural Pride and Environmental Prejudice: The Effect of Personal Status, Historical Value, and Indoor Décor on Occupants Indoor Environmental Quality in Offices*. Recuperado el 21 de junio de 2013, de: www.plea2009.arc.ulaval.ca: www.plea2009.arc.ulaval.ca/attaches/awards/2-3-01-PLEA2009Quebec.pdf
- Fanger, P. (1973). Assessment of man's thermal comfort practice. *British Journal of Industrial Medicine*, 30, 313-324.
- Figueroa, R.; Bobadilla, A.; Besser, D.; Díaz, M.; Arriagada, R. y Espinoza, R. (12 de septiembre de 2013). *Air Infiltration in Chilean Housing: A Baseline Determination*. Recuperado el 12 de junio de 2014, de: mediatum.ub.tum.de: mediatum.ub.tum.de/doc/1169604/1169604.pdf
- Fissore, A. (2012). *La realidad energética en el sector residencial de la Región del Bío Bío*. Santiago: EPCAmericas.
- Frontczak, M. (2011). *Human comfort and self-estimated performance in relation to indoor environmental parameters and building features*. Tesis Doctoral, DTU Civil Engineering Report R-260. Reino Unido.
- Gómez-Aspeitía, G.; Bojórquez, G. y Ruiz, R. (2007). El confort térmico: dos enfoques teóricos enfrentados. *Palapa* 2(1), 45-57.
- Hendron, R. & Engebretch, C. (2010). *Building America House Simulation Protocols*. Tennessee: National Renewable Energy Laboratory.
- Hensen, J. & Lambert, R. (2011). *Building Performance Simulation for Design and Operation*. Londres: Routledge.

- Jankovic, L. (2012). *Designing Zero Carbon Buildings Using Dynamics Simulation Methods*. Nueva York: Routledge.
- Jirón, P. (2011). On Becoming 'La Sombra/The Shadow'. En: M. Buscher, J. Urry & K. Witchger. *Mobile methods* (pp. 36-53). Nueva York: Routledge.
- Jirón, P. e Iturra, L. (2011). Momentos móviles. Los lugares móviles y la nueva construcción del espacio público. *Arquitecturas del Sur*, (39), 44-57.
- Krygiel, E. & Nies, B. (2008). *Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling*. Indianapolis: Wiley.
- León, L.; Muñoz, S.; León, J. y Bustamante, P. (2011). Monitorización de variables medioambientales y energéticas en la construcción de viviendas protegidas: edificio Cros-Protecnia en Sevilla. *Informes de la construcción* 62(519), 67-82.
- Peeters, L.; Dear, R.; Hensen, J. & D'Haeseleer, W. (2009). Thermal Comfort in Residential Buildings: Comfort Values and Scales for Buildings Energy Simulation. *Applied Energy* 86(5), 772-780.
- Sarmiento, P. y Hormazábal, N. (2003). Habitabilidad térmica en las viviendas básicas de la zona central de Chile a la luz de los resultados preliminares del Proyecto Fondef D001103941. *Revista INVI* 46(18), 23-32.
- Smith, V. (2012). Modeling Building Thermal Response to HVAC Zoning. *ACM SIGBED Review* 9(3), 39-45.



Modelación de la producción primaria fitoplanctónica en el humedal Jaboque, Bogotá D.C.

Modeling of primary production of phytoplankton in the wetland Jaboque, Bogotá D.C.

Julio Eduardo Beltrán Vargas¹

Fecha de recepción: 4 de octubre de 2014

Fecha de aceptación: 18 de septiembre de 2015

Cómo citar: Beltrán Vargas, J. E. (2016). Modelación de la producción primaria fitoplanctónica en el humedal Jaboque – Bogotá D.C. *Revista Tecnura*, 20(47), 85-95. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a07

Resumen

Se presenta un modelo de simulación dinámico para explicar el comportamiento general de la producción primaria fitoplanctónica en el humedal de Jaboque – Bogotá D.C., Colombia, en tres secciones con características físicas y químicas diferenciales. El modelo tiene en cuenta las variables fisicoquímicas, área de la cubeta, profundidad, precipitación media anual, temperatura del agua, pH y concentración de clorofila_a. La modelación dinámica se basó en ecuaciones diferenciales y se utilizó el método Euler de integración, la modelación se desarrolló utilizando el programa computacional Stella 9.1[®]. El modelo permite cuantificar la producción primaria fitoplanctónica del humedal de Jaboque a partir de la concentración promedio mensual de clorofila_a, para cada sección. Los resultados de la modelación de la Ppf evidencian que las variaciones de la concentración de la Ppf en cada sección del humedal siguen un patrón inverso al comportamiento bimodal de la precipitación. Se encontró un alto grado de correspondencia entre los valores de clorofila_a de campo y la Ppf modelada de la siguiente

manera $r^2 = 0.86$ para la primera sección y $r^2 = 0.86$ y $r^2 = 0.79$ para las secciones restantes. La determinación del error relativo fue de 0,57, para la primera sección y 0,35; 0,46, indicando que los resultados no están sobrestimados. El modelo muestra en términos generales los aspectos funcionales del comportamiento de la Ppf y su relación con el proceso de eutroficación, y permite hacer recomendaciones para el manejo y restauración del humedal.

Palabras clave: humedal, Jaboque, modelación, dinámica, producción fitoplanctónica

Abstract

A dynamic simulation model is presented to explain the general behavior of the primary production of phytoplankton in the wetland Jaboque–Bogota, Colombia, in three sections with differential physical and chemical characteristics. The model takes into account the physicochemical variables, the basin area, depth, annual rainfall, water temperature, pH and concentration of chlorophyll _a. The dynamic modeling is based on differential equations and the Euler integration method is used, the modeling was

¹ Biólogo Marino, magister en Planificación y Administración del Desarrollo Regional, máster en Ecoauditoría y Gestión Ambiental Empresarial, doctor en Ciencias – Biología. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: jebeltran@udistrital.edu.co

developed using Stella 9.1® computer program. The model allows quantifying the primary production of phytoplankton in wetland Jaboque from chlorophyll_a monthly average concentration for each section. The results of the Ppf modeling show that Ppf concentration variations in each section of the wetland follow a reverse pattern to the bimodal behavior of precipitation. A high degree of correspondence between the values of chlorophyll_a Ppf field and modeled in the following manner $r^2 = 0.86$ for the first

section and $r^2 = 0.86$ and $r^2 = 0.79$ for the remaining sections was found. Error determination was 0,57 relative to the first section and 0,35; 0,46, indicating that the results are not overstated. The model shows in general terms the functional aspects of behavior Ppf and its relation to the process of eutrophication, and it allows recommendations for the management and restoration of wetlands.

Keywords: dynamic, modeling, Jaboque, production of phytoplankton, wetland

INTRODUCCIÓN

En los lagos la producción primaria puede considerarse de dos modos: la que se da dentro del mismo lago (producción primaria autóctona) y la que llega al sistema luego de haber sido sintetizada en áreas diferentes (producción primaria alóctona). En los ecosistemas acuáticos, las microalgas y las cianobacterias constituyen el primer eslabón de la cadena trófica (Grimshaw *et al.*, 1997). En su condición de productor primario, el fitoplancton permite la entrada de energía al sistema (Gómez, Larduet y Abrahantes, 2001). La producción primaria está determinada por la cantidad de luz, CO₂ y la variación de formas nitrogenadas y fosfatadas. Según la cantidad de nutrientes disueltos, los ecosistemas acuáticos pueden ser calificados como oligotróficos, con pocos nutrientes y, por tanto, con baja producción primaria, o en el otro extremo, hipereutrófico, en donde la generación continua de biomasa, principalmente de fitoplancton, genera problemas en los flujos energéticos

(Contreras, Castañeda y Torres, 1997). En los humedales, donde el flujo de agua es mínimo, la mayoría de la materia orgánica en partículas permanece cerca de o en los sitios de producción, y los nutrientes son reciclados y retenidos por la microbiota allí presente a medida que la materia orgánica se descompone (Grimshaw *et al.*, 1997). La cantidad de clorofila es proporcional a la cantidad de fitoplancton y esta es a su vez proporcional al estado trófico del cuerpo de agua. Como tal, la concentración de clorofila_a (Ryding y Rast, 1989) y la producción primaria fitoplánctónica (Hakanson y Boulion, 2003) pueden ser usadas como indicadores apropiados para determinar el grado de eutroficación en lagos y en humedales (tabla 1).

Los valores de la producción primaria fitoplánctónica son medidos en unidades de energía o masa de carbón orgánico (C) y se utiliza frecuentemente para estimar la productividad biológica o el estado trófico de los cuerpos de agua (Hakanson y Boulion, 2002). La cantidad de clorofila_a en el agua es correspondiente con la cantidad de fitoplancton

Tabla 1. Estado trófico basado en la concentración de clorofila_a y la producción primaria

Estado trófico	Chl_a / mg/m ³	Producción primaria fitoplancton mgC m ³ *año
Oligotrófico	<2,5	<30
Mesotrófico	2-8	25-60
Eutrófico	6-35	40-200
Hipertrófico	30-400	130-600

Fuente: Boulion y Hakanson (2003).

(Hakanson y Peters, 1995; Wetzel, 2001; Gocke, Mancera, Vidal y Fonseca, 2003). La cantidad de fitoplancton es proporcional al estado trófico de los cuerpos de agua. Se puede utilizar la concentración de clorofila_a y su equivalente en mgC/m^3 para establecer la producción primaria fitoplanctónica. Para estimar la producción primaria fitoplanctónica del humedal Jaboque se elaboró un modelo de simulación dinámica basado en el principio de balance de masas, el cual permite relacionar la concentración de clorofila_a con la producción primaria fitoplanctónica expresada en unidades de $C\ mg/m^3$ (Hakanson y Boulion, 2003; Rivera, 2006).

METODOLOGÍA

Área de estudio

El humedal Jaboque se ubica en la localidad de Engativá, en el occidente de la ciudad de Bogotá, Colombia (figura 1); está contiguo a la cuenca del río Juan Amarillo, entre el Aeropuerto Internacional El Dorado y la Autopista Medellín. Abarca aproximadamente 57 ha y presenta una forma alargada en dirección sur-oriente-noroccidente.

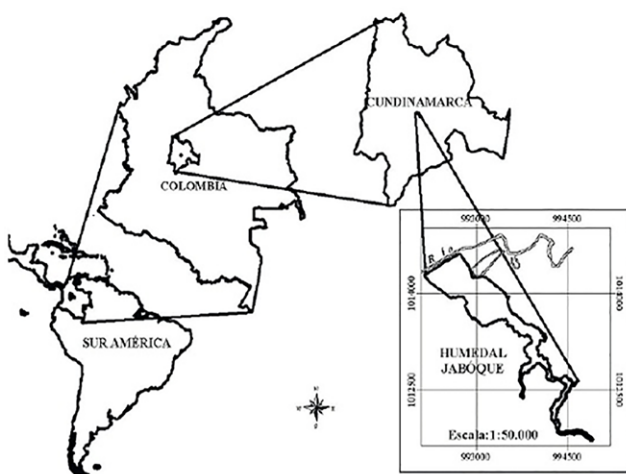


Figura 1. Localización geográfica del humedal Jaboque

Fuente: Sierra y Monsalve (2005).

En las últimas cuatro décadas, el humedal Jaboque ha visto reducida su extensión por la variación del drenaje, la colmatación por cargas orgánicas de las aguas y vertimientos, ocupación por construcción y su fraccionamiento. Esta situación ha incidido para que el humedal esté perdiendo, por una parte, su función ecosistémica, y por la otra, sus atributos como: *biodiversidad, estructura, procesos y funciones*.

Método de simulación

La modelación se realizó con el *software Stella 9.1*°, utilizado en modelaciones hidrológicas y ecológicas (Jorgensen y Bendoricchio, 2001; Zhang y Mitsch, 2005; Jorgensen, 2008). Se trabajó el sistema de interfaz, para predecir el comportamiento de productividad primaria a partir de las concentraciones promedio de clorofila_a para cada sección; también para realizar los análisis de sensibilidad del modelo relacionando la precipitación con la productividad primaria fitoplanctónica y así poder determinar el estado trófico del humedal (tabla 2). El modelo conceptual se transformó mediante algoritmos. En cada variable se desarrollaron las respectivas ecuaciones para establecer la relación entre las variables moderadoras, independientes y de estado del modelo. La simulación tuvo por objeto conocer y predecir el comportamiento de las fluctuaciones de la producción primaria fitoplanctónica (Ppf) y estado trófico del humedal en sus tres secciones. Con el fin de verificar el carácter determinístico del modelo y realizar su validación, se llevaron a cabo regresiones simples lineares (Legendre y Legendre, 1998; Rivera, 2006), entre los valores de clorofila_a y la Ppf que permitieron comparar los valores estimados según análisis de laboratorio con los resultados modelados. Para evaluar la fortaleza del modelo, se determinó el error relativo (Bryhn y Hakanson, 2007; Jorgensen y Bendoricchio, 2001; Zhang y Mitsch, 2005; Hakanson, 2004) y para evidenciar el carácter predictivo se analizó la sensibilidad del mismo modelo (Hakanson, 2004; Jorgensen, 2008) .

VARIABLES DEL MODELO

Tabla 2. Variables utilizadas en el modelo

Variables e índices	Valores/Unidades	Fuente
Profundidad sección	m	Instituto de Ciencias Naturales – Grupo de investigación Biodiversidad y conservación – Universidad Nacional de Colombia
Precipitación	m.m/año	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)
Área sección	m ²	Instituto de Ciencias Naturales – Grupo de investigación Biodiversidad y conservación – Universidad Nacional de Colombia
Volumen	mm	Datos de campo U. Nacional/Simulación
Temperatura	Centígrados	Instituto de Ciencias Naturales – Grupo de investigación Biodiversidad y conservación – Universidad Nacional de Colombia
Concentración de clorofila _a	mg/m ³	Instituto de Ciencias Naturales – Grupo de investigación biodiversidad y conservación – Universidad Nacional de Colombia
Tasa renovación fitoplancton	Kg wwC/m ³ /t ⁻¹	Hakanson y Boulion (2003)
Tasa de producción de fitoplancton	mgC/m ³ /t ⁻¹	Hakanson y Boulion (2003)
Concentración de fitoplancton	mgC/m ³ ,año	Simulado
Producción primaria inicial	kg ww C/m ³ ,año	Simulado
Producción primaria fitoplántonica biomasa	kg ww C/m ³ ,año	Simulado

Fuente: elaboración propia.

SUPUESTOS DEL MODELO

El modelo asume los siguientes supuestos, con el propósito de delimitar su alcance y posterior generalización o aplicación:

- La carga (Ci) de de clorofila_a se calcula a partir del punto de entrada de cada sección.
- Los datos de Chl_a (Clorofila a) disponibles corresponden a un año de muestreo, que representa periodos hídricos invierno-verano (Álvarez, 2005).
- En la modelación del estado trófico del humedal se tuvo en cuenta la concentración de Chl_a.
- La modelación consideró los promedios mensuales de Chl_a encontrados en las zonas de flujo de entrada a cada sección.
- De acuerdo con la zonificación del humedal Jaboque, se asumen tres secciones con características morfológicas, físicas y biológicas propias.
- El modelo hace referencia a la producción primaria fitoplanctónica.

EL MODELO DE SIMULACIÓN

A partir de la relación entre la concentración de clorofila_a y la producción primaria fitoplanctónica (calculada como $mgC/m^3/año$), se calculó la producción primaria fitoplanctónica y de acuerdo con Boulion y Hakanson (2003) en la ecuación (1) se trabajaron los siguientes algoritmos:

$$Ppf = (2,13 * Chl_a^{0,25} + 0.25)^4 \quad (1)$$

Donde,

Ppf = producción primaria fitoplanctónica calculada como $mg/m^3/mes$

Chl_a = concentración de clorofila a en mg/m^3 .

Realizando la transformación logarítmica, según las ecuaciones (2), (3), (4) y (5) (Boulion y Hakanson, A ; 2003)

$$\log(Ppf) = 0,97 \cdot \log(Chl_a + 2,49) \quad (2)$$

$$Ppf = 30,6 * Chl^{0,927} \approx 30 * Chl_a \quad (3)$$

$$Bm(t) = Bm_u(t - dt) + (IPR - El) * dt \quad (4)$$

Bm = biomasa de producción primaria por unidad en kg w

IPR = producción primaria inicial en kg ww * semana

El = tasa de renovación de organismos consumidores kg ww*semana (Boulion y Hakanson, 2003).

$$Ppf = (30,6 * Chl_a^{0,927}) * 0,45 * 30 * \text{Área} * Z * 0,01 * \left(\frac{RWT + 0,1}{17}\right) * \frac{Bmp}{BMf} \quad (5)$$

Ppf = producción primaria inicial (kg ww/ semana).

Chl = promedio mensual de concentración de clorofila_a (mg/m^3).

$Chl_a = 0,927 * 30,6$ = patrón de conversión de Chl en producción primaria fitoplanctónica en $Cmg/m^3/d$.

0,45 = factor de conversión estándar para transformar Cg semana a g dw/mes.

Área = área de la cubeta.

Z = profundidad promedio.

RWT = temperatura media de referencia.

Bmp/BMf = relación entre la biomasa de las entradas de plancton y la biomasa calculada de fitoplancton. El rango de esta relación es aproximado a 0,25 (Boulion y Hakanson, 2003).

de clorofila_a tienden a disminuir, resultado que se debe al hecho de que la primera y segunda sección reciben con mayor fuerza la descarga de nutrientes de la cuenca aferente (Fraile, Orive y Pozo, 1995; Boulion y Hakanson, 2003) (figura 2 y tabla 3). Estos resultados sugieren que las condiciones climáticas y el hidroperiodo influyen en el comportamiento de la clorofila_a como lo sugieren Ryding y Rast (1989). En el mismo sentido, Jiménez (2006) encontró para el lago de Guatavita, (Cundinamarca, Colombia) variaciones de clorofila_a debidas a la radiación solar; sin embargo, estas no fueron ocasionadas por el hidroperiodo. Montoya y Aguirre (2010) en la ciénaga Escobillitas (Antioquia) hallaron una relación entre la variación los clorofila_a, la producción primaria y el pulso de inundación.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Comportamiento de la clorofila_a en el humedal de Jaboque

Las variaciones de la concentración de la clorofila_a en cada sección del humedal siguen un patrón inverso al comportamiento bimodal de la precipitación. En los meses secos las concentraciones aumentan, mientras que en los meses lluviosos tienden a descender. Las dos primeras secciones muestran las mayores concentraciones de clorofila_a, y en la tercera sección las concentraciones

Producción primaria fitoplanctónica

Los resultados de la modelación de la producción primaria del fitoplancton en el humedal Jaboque ($mgCm^{-3}$), para todas las secciones, se presentan en la figura 3 y en la tabla 3. Se observa que la producción primaria aumenta en los periodos de menores precipitaciones (diciembre-febrero y julio-septiembre) y en los periodos de altas precipitaciones disminuye (abril, mayo, junio y octubre, noviembre). Es innegable una fuerte relación entre la actividad biológica y el ciclo hidrológico.

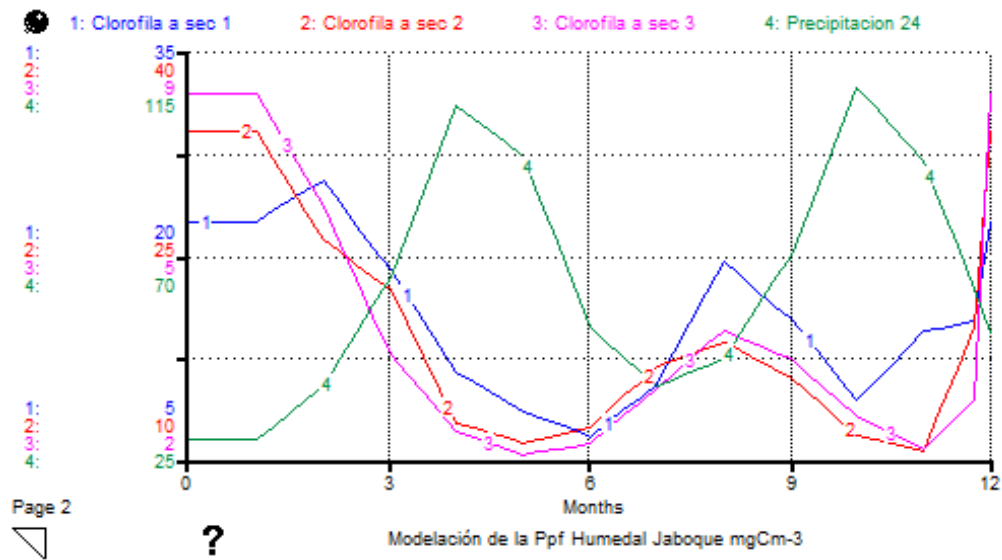


Figura 2. Resultado de la modelación de clorofila_a para el humedal de Jaboque, en las tres secciones

Fuente: elaboración propia.

1: Clorofila_a Sec 1 mg/m^3 .

2: Clorofila_a Sec 2 mg/m^3 .

3: Clorofila_a Ssec 3 mg/m^3 .

4: Precipitación mm año.

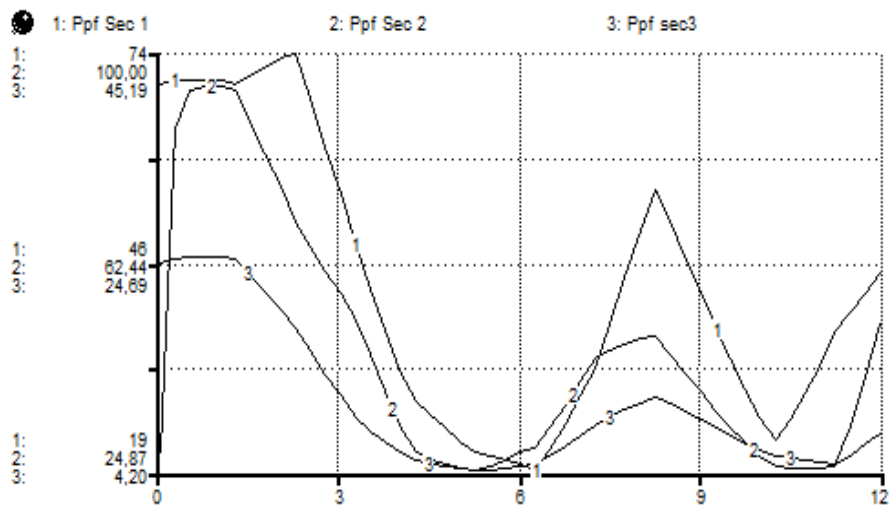


Figura 3. Modelación de la productividad primaria fitoplanctónica para todas la secciones

Fuente: elaboración propia.

1: Producción primaria fitoplanctónica Sec 1 $mgCm^{-3} \cdot año$.

2: Producción primaria fitoplanctónica Sec 1 $mgCm^{-3} \cdot año$.

3: Producción primaria fitoplanctónica Sec 1 $mgCm^{-3} \cdot año$.

Sección 1. Zona intervenida (tercio alto)

En esta sección (figura 3 y tabla 3), durante los meses secos (enero, febrero, marzo) la producción primaria fluctuó entre $70,29 \text{ mgC/m}^3$ y $44,5 \text{ mgC/m}^3$, en los de agosto y septiembre entre $21,9 \text{ mgC/m}^3$, $39,21 \text{ mgC/m}^3$; en diciembre fue de $36,8 \text{ mgC/m}^3$ y en los meses de mayores precipitaciones (abril, mayo y junio) los valores fluctuaron entre $28,5 \text{ mgC/m}^3$ y $16,7 \text{ mgC/m}^3$, y en octubre y noviembre, $23,3 \text{ mgC/m}^3$ y $29,53 \text{ mgC/m}^3$. El promedio mensual para toda la sección fue de $35,10 \text{ mgC/m}^3$ y la desviación estándar fue de $15,77$, lo cual indica que existe variación. La relación entre los valores de clorofila_a estimados con aquellos que se modelaron de la producción primaria fitoplanctónica (Hakanson y Boulion, 2003; Kuo, Hsieh, Lung y She, 2007) se realizó un análisis de regresión y sus resultados mostraron una buena correspondencia entre los dos grupos $r^2 = 0,85$; $y = 0,3458x + 2,6623$.

Sección 2. Zona de transición (tercio medio)

En esta sección (figura 3 y tabla 3), en los meses secos (enero, febrero, marzo) la producción primaria fluctuó entre $77,8 \text{ mgC/m}^3$ y $50,02 \text{ mgC/m}^3$;

durante agosto y septiembre estuvo entre $41,6 \text{ mgC/m}^3$ y $35,4 \text{ mgC/m}^3$; en diciembre fue de $31,5 \text{ mgC/m}^3$; en los meses de mayores precipitaciones (abril, mayo y junio) los valores fluctuaron entre $32,2 \text{ mgC/m}^3$ y $24,8 \text{ mgC/m}^3$, mientras que en octubre y noviembre fue de $27,1 \text{ mgC/m}^3$ y 25 mgC/m^3 . El promedio mensual para toda la sección fue de $39,17 \text{ mgC/m}^3$ y la desviación estándar fue de $16,73$, mostrando que existe variación. La relación entre los valores estimados de clorofila con aquellos modelados de la producción primaria fitoplanctónica mostraron que entre los dos grupos hay una buena correspondencia $r^2 = 0,8631$; $y = 0,4043x + 0,8631$.

Sección 3. Zona conservada (tercio bajo)

En esta sección (figura 3 y tabla 3), en los meses secos (enero, febrero, marzo), la producción primaria fluctuó entre $15,9 \text{ mgC/m}^3$ y $12,5 \text{ mgC/m}^3$; en agosto y septiembre estuvo entre $8,87 \text{ mgC/m}^3$ y $7,98 \text{ mgC/m}^3$; en diciembre fue de $7,5 \text{ mgC/m}^3$; en los meses de mayores precipitaciones (abril, mayo y junio) los valores fluctuaron entre $5,61 \text{ mgC/m}^3$ y $4,16 \text{ mgC/m}^3$, y en octubre y noviembre fue de

Tabla 3. Resultados de la modelación de Chl_a y la Ppf

Meses	Precipitación	Chl_a Sección 1 mg/m ³	Ppf Sección 1 mgCm ⁻³	Chl_a Sección 2 mg/m ³	Ppf Sección 2 mgCm ⁻³	Chl_a Sección 3 mg/m ³	Ppf Sección 3 mgCm ⁻³
Enero	29	22,5	70,29	34,2	77,8	7,8	12,5
Febrero	41	25,5	55,67	26,1	63,51	5,85	15,96
Marzo	65	18,9	44,5	22,5	50,02	3,3	9,72
Abril	103	11,4	28,55	12,6	32,29	1,95	5,61
Mayo	92	8,4	20,28	11,1	24,85	1,56	4,15
Junio	54	6,6	16,02	12,3	25,73	1,74	4,16
Julio	41	10,5	21,99	16,8	35,15	2,7	6,36
Agosto	47	19,5	39,21	18,6	41,67	3,69	8,87
Septiembre	70	15,3	34,98	15,9	35,39	3,21	7,98
Octubre	107	9,3	23,35	11,7	27,12	2,22	5,92
Noviembre	91	14,4	29,53	10,5	25	1,65	4,76
Diciembre	53	15,3	36,85	22,8	31,5	2,8	7,5
Promedio	66,08	14,80	35,10	17,93	39,17	3,21	7,79
Desviación estándar	26,39	5,89	15,77	7,28	16,73	1,87	3,57

Fuente: elaboración propia.

5,92 mgC/m^3 y 4,76 mgC/m^3 . El promedio mensual para toda la sección fue de 7,79 mgC/m^3 y la desviación estándar fue de 15,77, mostrando que existe variación. La relación entre los valores de clorofila *a* estimados con aquellos modelados de la producción primaria fitoplanctónica (Hakanson y Boulion, 2003; Kuo, Hsieh, Lung y She, 2007) se realizó mediante análisis de regresión, y sus resultados mostraron que entre los dos grupos hay una buena correspondencia $r^2 = 0,792$; $y = 1,6947x + 2,358$.

Los resultados anteriores indican que la clorofila *a* y la producción primaria fitoplanctónica se relacionan con el hidropериodo y el transporte de nutrientes como lo sugieren Ryding y Rast (1989). Pinilla (2006) encontró un patrón de comportamiento similar en la laguna de Guatavita (Cundinamarca, Colombia) y un lago amazónico (Hernandez, Aguirre, Palacio y Ramírez, 2008) hallaron que en la ciénaga de Ayapel (Córdoba, Colombia), los nutrientes y la clorofila *a* se encuentran regulados por el hidropериodo y el pulso de la inundación.

Error relativo

Para verificar la capacidad de predicción o fortaleza del modelo se determinó el error relativo (Bryhn y Hakanson, 2007; Jorgensen y Bendoricchio, 2001), para cada una de las secciones, para lo cual se compararon los valores medidos, clorofila *a* con los valores resultante de la modelación de la Ppf. El valor promedio del error relativo para el tercio alto es de 1,36, para el segundo tercio de 1,21, y para el tercero, de 1,56; y las desviaciones estándar fueron de 0,30 para el primer tercio, 0,29 para el segundo y el tercero de 0,36, cifras que indican que el modelo no tiende a sobreestimar los valores es su predicción.

Estado trófico (IST) basado en la producción primaria

Los resultados de la modelación permitieron establecer las cantidades de clorofila *a*, debido a que esta es proporcional a la cantidad de fitoplancton

y esta es a su vez proporcional al estado trófico del cuerpo de agua de acuerdo con Hakanson y Boulion, (2003) y Ryding y Rast (1989), se utilizaron para determinar el estado trófico de cada una de las secciones del humedal (tablas 1 y 3). Los resultados anteriores permiten inferir que a mayores descargas de agua de la cuenca aferente es posible disminuir las condiciones de eutrofia en las dos primeras secciones, y en la tercera sección mejorar o disminuir la tendencia a la mesotrofia, como lo sugiere Jorgensen (2003) que al aumentar la descarga de agua se presenta un lavado de nutrientes, mejorando las condiciones tróficas, fenómeno similar al observado con el comportamiento del fósforo total en el humedal.

Análisis de sensibilidad del modelo

Para el análisis de sensibilidad del modelo se tuvo en cuenta el promedio anual de la clorofila *a* en mg/m^3 como variable independiente expresada en clases entre 4,0 mg/m^3 y 18 mg/m^3 y como variable dependiente la Ppf expresada en $mgCm^{-3}$. En la figura 4 se aprecian los resultados de análisis de sensibilidad, para la tercera sección. Las curvas de la figura corresponden a los cambios en la Ppf según cada nivel de variación de los valores de clorofila *a* entre clases desde 4 mg/m^3 a 18 mg/m^3 ; las coordenadas señalan el tiempo en meses, y la abscisa a los valores de Ppf en $mgCm^{-3}$. Los resultados permitieron corroborar la correspondencia entre los valores de clorofila *a* y la Ppf, a medida que aumentan las cantidades de clorofila *a* aumenta la Ppf, como lo sugieren Wetzel (2001); Gocke, Mancera, Vidal y Fonseca, (2003). Se percibe una fuerte influencia del ciclo hidrológico en el comportamiento de la marcha de las dos variables, en las épocas más lluviosas (abril, mayo, junio y octubre, noviembre) la Ppf disminuye y aumenta en los periodos secos, como ocurre en el humedal Jaboque (Álvarez, 2005). Esto se debe, en parte, a la oferta de nutrientes que se concentra en las épocas de verano cuando disminuye el volumen de agua y la concentración se diluye cuando aumenta el

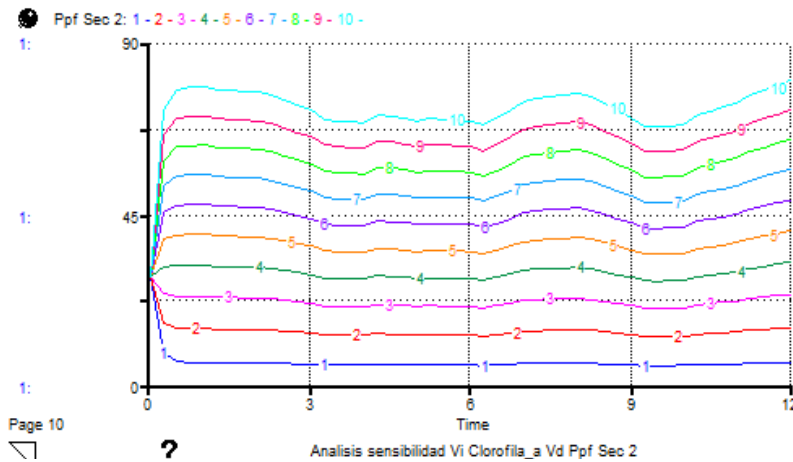


Figura 4. Análisis de sensibilidad. Tercio bajo. Variable independiente clorofila_a, variable dependiente Ppf

Fuente: elaboración propia.

Ppf sec1: productividad primaria fitoplánctónica $mgCm^{-3} \cdot año$.

1, 2,3...: niveles de variación clorofila_a entre 4 mg/m^3 y 18 mg/m^3 .

volumen de agua. Los resultados anteriores sugieren que para mantener una condición mesotrófica en el humedal, el máximo permisible correspondería a 11,8 mg/m^3 de clorofila_a con una Ppf de 29,1 $mgCm^{-3}$.

CONCLUSIONES

Las dos primeras secciones muestran las mayores concentraciones de clorofila_a, mientras que la tercera sección las concentraciones de clorofila_a tienden a disminuir, resultado que se debe al hecho de que la primera y segunda sección reciben con mayor fuerza la descarga de nutrientes de la cuenca aferente; sin embargo la segunda sección presenta los mayores valores de clorofila_a. En la tercera sección las concentraciones disminuyen de manera significativa, indicando mejor condición trófica, como lo señala Álvarez (2005). Los resultados de la modelación permitieron corroborar que las cantidades de clorofila_a son proporcionales a la Ppf y esta a su vez es proporcional al estado trófico del humedal. Se encontró dependencia entre el ciclo hidrológico y el comportamiento de la producción primaria fitoplanctónica; como lo indica

Álvarez (2005), este fenómeno es más acentuado en el tercio alto y disminuye gradualmente hacia al tercio bajo. Estos resultados corroboran la relación entre la clorofila_a y la producción primaria fitoplanctónica como lo sugieren Ryding y Rast (1989) y como los reportados para la ciénaga de Ayapel (Córdoba, Colombia) por Hernández, Aguirre, Palacio y Ramírez (2008).

La bondad de predicción del modelo se verificó mediante la determinación del error relativo con los siguientes valores: 1,36 y 0,3 de desviación estándar en el primer tercio; 1,21 para el segundo tercio, y 0,29 de desviación estándar; y en la tercera 1,56 y 0,36 de desviación, valores cercanos a cero. La correspondencia entre las variables del modelo entre los valores de clorofila_a y aquellos simulados de Ppf calculados, mostraron una alta reciprocidad, para el tercio alto de $r^2 = 0,86$; el tercio medio $r^2 = 0,86$; el tercio bajo $r^2 = 0,78$, respectivamente. Si bien hay diferencias, es posible que se deban al complejo patrón de distribución de nutrientes y así mismo de los procesos biogeoquímicos en el humedal (Álvarez, 2005). El análisis de sensibilidad del modelo permitió comprobar la relación entre una variable física como

es la precipitación y la correspondencia entre una variable química la clorofila_a y una de tipo biótico la producción primaria, mostrando el carácter holístico e integrador del modelo (Carpenter y Cottingham, 1997; Boumans *et al.*, 2002). También se evidenció la correspondencia entre las variables de entrada y salida del modelo, y su carácter predictivo. Además se demostró que la estructura y las variables del modelo reproducen de manera general el comportamiento de la producción primaria fitoplanctónica del humedal Jaboque.

De acuerdo con los resultados de la modelación se puede concluir que en el humedal Jaboque la producción primaria es alta en las dos primeras secciones y especial en los meses de menores precipitaciones; en la tercera sección, la productividad primaria disminuye de manera significativa marcando una diferencia clara entre un estado mesotrófico y el estado eutrófico de las dos primeras secciones. La modelación permitió comprobar la bondad de utilizar indicadores de estado trófico, mostrando el potencial que tienen este tipo de indicadores en la vigilancia y control de la eutroficación.

FINANCIAMIENTO

Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Rectoría, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico (CIIDC).

AGRADECIMIENTOS

Al Grupo de Investigación Biodiversidad y Conservación de la Universidad Nacional de Colombia – Instituto de Ciencias Naturales, y a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP), por el aporte de la información relacionada con el estudio de caso. A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Rectoría, la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales por el apoyo económico otorgado, al Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico (CIIDC) y el Grupo de Investigación INDESOS, quienes apoyaron la financiación

para la adquisición de los programas computacionales, el equipo de cómputo y la bibliografía especializada que se utilizó en la investigación.

REFERENCIAS

- Álvarez, J. (2005). Evaluación del estado trófico del humedal de Jaboque: análisis espacial y temporal de las características fisicoquímicas del agua y de la comunidad planctónica. En: *Informe final. Investigación aplicada en restauración ecológica en el humedal de Jaboque* (pp. 215-235). Bogotá: Convenio Acueducto de Bogotá–Universidad Nacional de Colombia.
- Boulion, V. & Hakanson, A. (2003). A New General Dynamic Model to Predict Biomass and Production of Bacterioplankton in Lakes. *Ecological Modelling* 160(2), 91-114.
- Boumans, R.; Constanza, R.; Farley, J.; Wilson, M.; Portela, R.; Rotmans, J.; Villa, F. y Grasso, M. (2002). Modeling the Dynamics of the Integrated Earth System and the Value of Global Ecosystem Services Using the GUMBO Model. *Ecological Economics* 41(3), 529-560.
- Bryhn, A. & Hakanson, L. (2007). A Comparison of Predictive Phosphorus Load-Concentration Models for Lakes. *Ecosystems* 10(7), 1084-1099.
- Carpenter, S. & Cottingham, K. (1997). Resilience and Restoration of Lakes. *Conservation ecology* 1(1), 2-3
- Contreras, F.; Castañeda, O. y Torres, R. (1997). Hidrología, nutrientes y productividad primaria en las lagunas costeras del estado de Oaxaca, México. *Hidrobiológica* 7(1), 9-17.
- Fraille, H.; Orive, E. y Pozo, J. (1995). Evaluación del estado trófico y comparación de modelos relativos al fósforo en los embalses de Cernadilla y Valparaiso (río Tera y Zamora). *Limnetica* 11(2), 29-37.
- Gocke, K.; Mancera, P.; Vidal, L. & Fonseca, D. (2003). Planktonic Primary Production and Community Respiration in Several Coastal Lagoons of the Outer Delta of the Rio Magdalena, Colombia. *Boletín de investigaciones marinas y costeras* 32(1), 125-144.
- Gómez, L.; Larduet, Y. y Abrahantes, N. (2001). Contaminación y biodiversidad en ecosistemas acuáticos.

- El fitoplancton en la bahía de Santiago de Cuba. *Rev. Invest. Mar.* 22(3), 191-197.
- Grimshaw, H.; Wetzel, R.; Brandenburg, M.; Segerblom, K.; Wenkert, L.; March, G.; Charnetzky, W.; Haky, J. & Carraher, C. (1997). Shading of Peryphyton Communities by Wetland Emergent Macrophytes: Decoupling of Algal Photosynthesis from Microbial Nutrient Retention. *Archiv für Hydrobiologie* 139(1), 17-27.
- Hakanson, L. (2004). Break-Through in Predictive Modelling Opens new Possibilities for Aquatic Ecology and Management—A Review. *Hydrobiologia. Volume 518(1-3)*, 135-157.
- Hakanson, L. & Peters, R.H. (1995). *Predictive Limnology: Methods for predictive modelling*. Amsterdam: SPB Academic Publishing.
- Hakanson, L. & Boulion, V. (2002). Empirical and Dynamical Models to Predict the Cover, Biomass and Production of Macrophytes in Lakes. *Ecological Modelling* 151(2), 213-243.
- Hakanson, L. & Boulion, V. (2003). A General Dynamic Model to Predict Biomass and Production of Phytoplankton in Lakes. *Ecological Modelling* 165(2), 285-301.
- Hernandez, E.; Aguirre, J.; Palacio, J. y Ramírez, J. (2008). Variación espacio temporal de la asociación fitoplanctónica en diferentes momentos del pulso hidrológico en la ciénaga de Ayapel, Córdoba. *Colombia actualidades biológicas* 30(88), 67-81.
- Jiménez, H. (2006). *Las variaciones diarias de la producción primaria y la concentración de la clorofila en un lago tropical (Guatavita, Colombia)*. Tesis inédita de maestría. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Jorgensen, S.E. (2003). The Application of Models to Find the Relevance of Residence Time in Lake and Reservoir Management. *Journal of limnology* 62 (1), 16-20.
- Jorgensen, S. (2008). Overview of the Model Types Available for Development of Ecological Models. *Ecological Modelling* 215(1), 3-9.
- Jorgensen, S. & Bendoricchio, G. (2001). *Fundamentals of ecological modelling*. Amsterdam: Elsevier Science Ltda.
- Kuo, J.T.; Hsieh, M.H.; Lung, W.S. y She, N. (2007). Using Artificial Neural Network for Reservoir Eutrophication Prediction. *Ecological Modelling* 200(1), 171-177.
- Legendre, P. y Legendre, L. (1998). *Numerical ecology*. Amsterdam: Elsevier Science.
- Montoya, Y. y Aguirre, N. (2010). *Dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en un lago tropical (ciénaga Escobilletas) a lo largo del pulso de inundación* (pp. 76-89). Medellín: Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia,
- Pinilla, G. (2006). Evaluación de la eficiencia fotosintética del fitoplancton en un lago amazónico (lago Boa) y en un lago andino (lago Guatavita). *Acta Amazónica* 36(2), 221-228.
- Rivera, C. (2006). *Modelos correlativos de algunas variables físicas, químicas y biológicas del lago Guatavita*. Tesis de maestría. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Ryding, S.O. & Rast, W. (1989). *Control of Eutrophication of Lakes and Reservoirs. Manual the Biophere Series*. Vol. 1. Nashville: Parthenon Publishing Group.
- Sierra, O.R. & Monsalve, C.A. (2005). *Zonificación trófica del humedal Jaboque, con base en la familia Bacillariophyceae, Engativá. Investigación aplicada en restauración ecológica en el humedal de Jaboque*. Bogotá: Acueducto de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia.
- Wetzel, R. (2001). Fundamental Processes Within Natural and Constructed Wetland Ecosystems: Short-Term Versus Long-Term Objectives. *Water Science & Technology* 44(11-12), 1-8.
- Zhang, L. & Mitsch, W. (2005). Modelling Hydrological Processes in Created Freshwater Wetlands: An Integrated System Approach. *Environmental Modelling & Software* 20(7), 935-946.





Detección de defectos en textiles mediante técnicas espaciales para análisis de textura

Defect detection in textiles using special techniques for texture analysis

José David Alvarado Moreno

Fecha de recepción: 15 de octubre de 2014

Fecha de aceptación: 18 de septiembre de 2015

Cómo citar: Alvarado Moreno, J. D. (2016). Detección de defectos en textiles, utilizando técnicas espaciales para análisis de textura. *Revista Tecnura*, 20(47), 97-106. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a08

Resumen

En el siguiente trabajo se presenta la utilización de técnicas espaciales de análisis de textura en imágenes para la identificación de defectos en textiles, en donde se presenta la aplicación de técnicas para pre-procesamiento, y para el análisis de textura los patrones locales binarios y la matriz de co-ocurrencia con fin de extraer características resaltar las diferencias e identificar los defectos en textiles haciendo uso del clasificador basado en la distancia de Mahalanobis.

Palabras clave: análisis de textura, distancia de Mahalanobis, defectos en textiles, matriz de co-ocurrencia, patrones locales binarios, filtrado de imágenes.

Abstract

This paper presents the use of spatial analysis techniques texture images for defects identification in textiles, where the application of pre-processing techniques is presented, and the analysis of texture local binary patterns and co-occurrence matrix to extract features to highlight differences and identify defects in textiles using classifier based on the Mahalanobis distance.

Keywords: Co-occurrence matrix, defects in textiles, Mahalanobis distance, pre-processing, local binary patterns, texture analysis.

¹ Ingeniero Electrónico, magister en Ingeniería de Control Industrial. Docente de la Universidad de Cundinamarca. Fusagasugá, Colombia. Contacto: jdalvarado@mail.unicundi.edu.co

INTRODUCCIÓN

El sector textil ha presentado cambios a través de los años, debido a factores como: la demanda, la globalización, la cantidad elevada de productores y cambios en la moda, lo que hace de esta industria un sector receptivo al cambio y en el que la innovación plantea mejoras en los diferentes procesos (Supersociedades, 2013).

En el proceso que las máquinas de hilar fibras realizan, es posible que se puedan presentar diferentes tipos de defectos que generan fallas en el tejido. Por lo general, para su identificación, una persona (operario) hace una inspección visual en busca de dichos defectos. En ocasiones, este tipo de control es insuficiente, pues los imperfectos son demasiado pequeños y no se perciben a simple vista, o porque la fatiga del inspector de calidad impide la identificación (Che-Seung, Byeong-Mook y Moo-Jin, 2005).

Para la inspección automática de los defectos, en el mercado encontramos diferentes soluciones para la industria textil (Ullua y Rodríguez, 2009), en las cuales se han implementado diferentes técnicas de procesamiento de imágenes para la detección de los defectos. En la literatura hay propuestas basadas en la transformada de Fourier (Chi-Ho y Pang, 1999), transformada *wavelet* (Sungshin, Hyeon, Seong-Pyo y Kwang-Baek,

2005), demodulación AM-FM (Ullua y Rodríguez, 2009), entre otros.

Anterior a este proyecto se desarrolló un estudio de técnicas de análisis de imágenes para la identificación de defectos en textiles (Fernández y Alvarado, 2010), en donde se clasificaban las imágenes en dos clases: *defectos* y *sin defectos* (figura 1); los resultados obtenidos de porcentaje de acierto se muestran en la tabla 1. Las técnicas, matriz de co-ocurrencia (GLCM) y patrones locales binarios (LBP) presentaron mejores resultados en porcentaje de clasificación y en tiempo de procesamiento, comparadas con el análisis de la energía de Laws.

Tabla 1. Resultados obtenidos en la etapa I

Tipo de Técnica	Porcentaje de acierto	Tiempo de procesamiento
Laws	82,96 %	2,064(s)
GLCM	91,32 %	0,025(s)
LBP	95,52 %	0,508(s)

Fuente: Fernández y Alvarado (2010).

En este artículo se presentan los resultados de la continuación de la evaluación de alternativas de las técnicas espaciales de análisis de textura, en donde se busca identificar los diferentes tipos de defectos que se producen en la fabricación de telas.

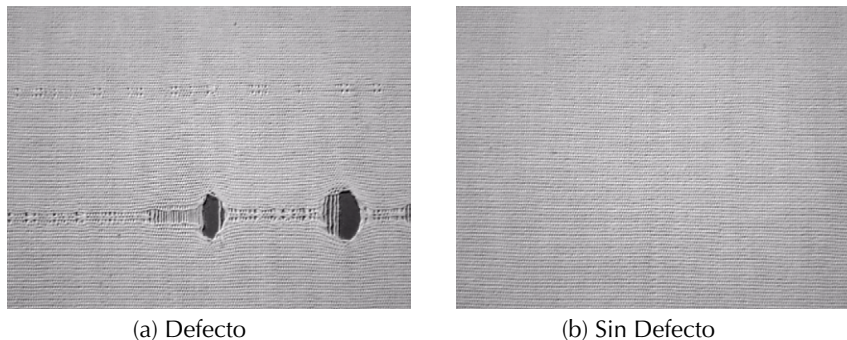


Figura 1. Imágenes originales base de datos

Fuente: elaboración propia

METODOLOGÍA

En este trabajo se utiliza la base de datos *texUAN* que cuenta con cerca de 2000 imágenes, las cuales representan muestras de tela que no tienen estampados ni adiciones de color y que fueron suministradas por empresas textiles de la ciudad de Ibagué (Tolima). Dicha base de datos está compuesta, originalmente, por imágenes de 640×480; se elaboró un subconjunto de imágenes de 100×100 divididas en las siguientes clases de imágenes: pique con 434, barrado con 421, mariposeo con 440, mota tejida con 318, mancha con 342, sin defecto con 1041, que corresponden a los diferentes tipos de defectos de estudio. En la figura 1 se pueden observar las imágenes de 640×480, y en la figura 2 las diferentes clases de las imágenes de 100×100.

El sistema propuesto se desarrolla en tres etapas: en la primera se analizan diferentes técnicas de filtrado para homogenizar la superficie de las imágenes; en la segunda se estudian técnicas espaciales de análisis de textura, y en la tercera se utiliza un sistema de clasificación y la matriz de confusión para verificar el funcionamiento del sistema de detección de defectos en textiles.

TÉCNICAS DE FILTRADO DE IMÁGENES

En el proceso de adquisición de las imágenes de la base de datos, el sistema de iluminación utilizado permitió la influencia de luz del entorno con el objetivo de simular un ambiente industrial, debido a esto las imágenes presentan diferencias en contraste y brillo. Para atenuar estas variaciones se buscaron diferentes alternativas para estabilizar los niveles de gris en la imagen.

Filtro basado en la transformada “wavelet”

Se propone la utilización de un filtro basado en la transformada *wavelet*, que busca mejorar la distribución de los niveles de gris de la superficie. Se realiza inicialmente un filtro para atenuar los niveles altos de iluminación mediante una *wavelet* Daubechies; en el caso de los niveles bajos de luminosidad se utiliza la *wavelet* Haar, donde se descarta la componente de baja frecuencia para obtener un realce de los niveles. En las figuras 3(b) y 3(c) se observa la imagen de salida y la superficie la imagen de la figura 3(a) aplicando esta técnica .

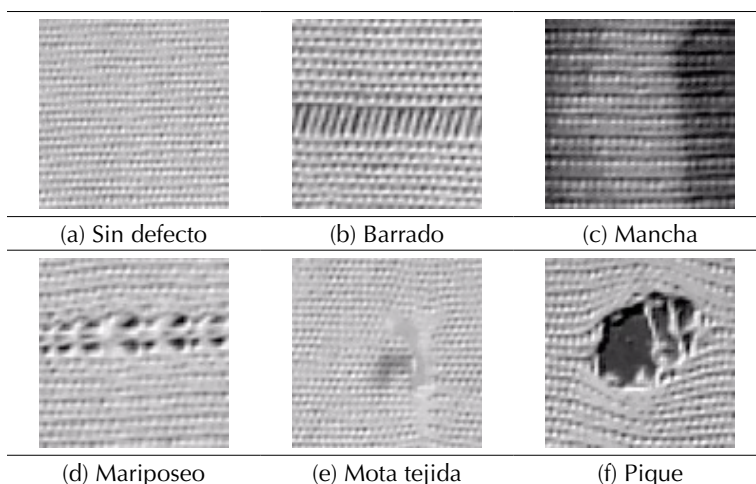


Figura 2. Tipos de imágenes de 100×100

Fuente: elaboración propia

Filtro espacial promedio

Para mejorar tanto la distribución de los niveles de gris de la imagen como la caracterización de la textura, se implementó un filtro espacial utilizando el concepto del *filtro promedio*. Lo que se plantea inicialmente es el cálculo de la media (μ) de la imagen, luego se busca que cada píxel esté a menor distancia con respecto a la media. Al aplicar este concepto, se tiene una imagen compacta y corrige algunos problemas de iluminación de la imagen. En la ecuación (1) se define matemáticamente el funcionamiento del filtro y en la figura 3(d) y 3(e) la imagen de salida y la superficie de la figura 3(a) aplicando esta técnica.

$$F_i(i, j) = \frac{I(i, j) + \mu I}{2} \quad \text{donde} \quad \mu I = \frac{1}{n + m} \sum_i^n \sum_j^m I(i, j) \quad (1)$$

TÉCNICAS ESPACIALES DE ANÁLISIS DE TEXTURA

Matriz de co-ocurrencia (GLCM)

La técnica matriz de co-ocurrencia analiza las repeticiones de la distribución de los niveles de gris que se presentan en una imagen, en función del píxel de interés y el píxel adyacente denominado *vecino*; la información recopilada en esta matriz describe la relación de los píxeles en una condición específica de textura.

Para realizar este análisis, la técnica se puede definir en la siguiente secuencia de pasos:

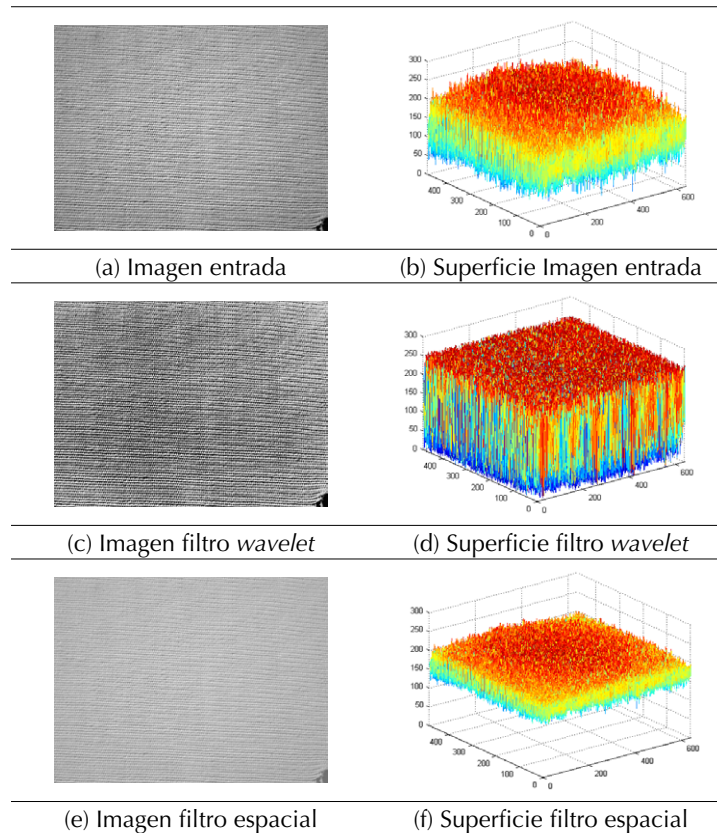


Figura 3. Funcionamiento técnicas de preproceso

Fuente: elaboración propia.

- La distancia del pixel de interés al vecino.
- El ángulo (Θ) para establecer el patrón de análisis.
- Los niveles o el número de bits de profundidad de la imagen.
- Recorrer la imagen para recopilar la información en la matriz.
- Utilización de los descriptores.

La distancia espacial interpixel sirve de referencia para el tamaño de la ventana; los valores de esta varían en números impares iniciando en 3×3 hasta 21×21 (Haralick, Shanmugam y Dinstein, 1973). El ángulo puede tomar valores de 0° , 45° , 90° , y 135° ; al variar estos valores es posible caracterizar diferentes tipos de textura o patrones de una textura en particular. En la figura 4 se observa la distribución de los ángulos en una venta de 3×3 .

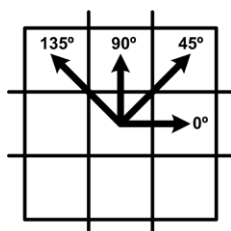


Figura 4. Distribución de GLCM

Fuente: elaboración propia.

Los niveles de la matriz GLCM se definen como 2^n , en donde n depende de la profundidad de la imagen (número de bits). Por lo general, el análisis de la textura se realiza en imágenes a escala de grises (8 bits), en este caso, el número de niveles es de 256. En la tabla 2 se presenta un ejemplo de la distribución de las posibles combinaciones presentes en una textura de 5 niveles para matriz GLCM. Por lo cual para 256 niveles obtenemos una matriz de tamaño 256×256 que contiene la información de

la distribución espacial, en una distancia y ángulo específico. Por último, se utilizan algunos descriptores de textura (Haralick, 1979) como energía, entropía, contraste, correlación y homogeneidad.

Tabla 2. Matriz de co-ocurrencia

	0	1	2	3	4
0	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(0,4)
1	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)
2	(2,0)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)
3	(3,0)	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)
4	(4,0)	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)

Fuente: elaboración propia.

Patrones locales binarios (LBP)

El operador de análisis de textura LBP está definido como una medida invariante a la escala de grises, derivado de una definición general de la textura en una vecindad local (Alvarado y Fernández, 2010). La propuesta original (Ojala, Pietikäinen y Harwood, 1999) consiste en la comparación de pixel central con los vecinos, en donde el pixel central es tomado como el umbral con respecto a sus vecinos. Al comparar el pixel central con el vecino se le asigna un valor de uno (1) si el vecino es mayor o igual; en caso contrario, se le asigna un valor de cero (0). A cada resultado del umbral se le asigna un peso de 2^n , en donde n depende de la posición del vecino con respecto al pixel central. Por último, se realiza una suma de los diferentes pesos obteniendo la representación LBP de pixel.

El funcionamiento del operador original se presenta en la figura 5, donde se analiza una ventana de tamaño 3×3 y la relación del pixel central en esta caso con sus 8 vecinos. El equivalente LBP para los valores de la figura 5(b) se presentan en la ecuación (2).

$$LBP = (0 * 1) + (1 * 2) + (1 * 4) + (1 * 8) + (2) (1 * 16) + (0 * 32) + (0 * 64) + (1 * 128) = 158 \quad (2)$$

50	95	85	0	1	1	1	2	4
72	50	92	0		1	128		8
45	87	80	0	1	1	64	32	16
(a) Muestra			(b) Patrón			(c) Pesos		

Figura 5. Funcionamiento del operador LBP

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, del operador LBP original se deriva uno nuevo, que modifica los tamaños de la ventana y el número de vecindades para pixel de interés (Mäenpää, 2003). Para esta derivación se definen unos parámetros denominados R y P , donde R corresponde a la distancia (radio) a partir del pixel de origen al vecino y P el número de vecinos utilizados para el cálculo de LBP.

La distancia y la distribución de los vecinos P se encuentran igualmente espaciados y repartidos en una circunferencia simétrica que se construye a partir del valor de R , para valores de $R > 0$ y $P > 1$. Al modificar P y R se pueden obtener diferentes medidas de textura del área de interés. En la figura 6 se puede observar la distribución de los vecinos para diferentes valores de R y P .

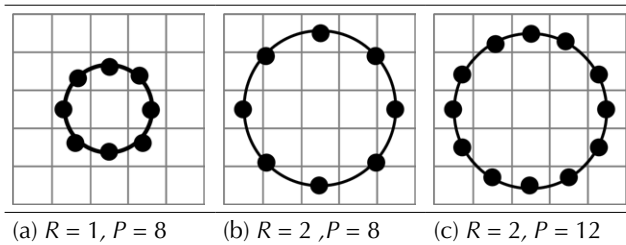


Figura 6. Funcionamiento del operador LBP

Fuente: elaboración propia.

La distribución circular de los pixeles vecinos se realiza mediante la ecuación (3), con la que se establece una aproximación inicial de la ubicación de los vecinos, a lo que es necesario complementarlo con un proceso de interpolación para definir las coordenadas (x,y) de los vecinos:

$$x = R \text{ Sen} \left(\frac{2\pi p}{P} \right), y = R \text{ Cos} \left(\frac{2\pi p}{P} \right), \quad (3)$$

Por último, la derivación del operador LBP para una imagen se define en la ecuación (4).

$$LBP_{P,R}(x_c, y_c) = \sum_{p=0}^{P-1} s(g_c - g_c) 2^p \quad (4)$$

Patrones locales binarios invariantes a la rotación

El trabajo de Ojala, Pietikainen y Mäenpää (2002) plantea un operador derivado del modelo $LBP_{P,R}$; en este se considera cada pixel como un centro de giro y se incorpora el concepto de la rotación invariante local utilizando la forma circular de la relación con sus vecinos; se establecen patrones de textura definidos de la forma circular del operador, que analiza las diferencias de textura debido a cambios en las posiciones relativas de una fuente de luz y el objeto de análisis. No considera los cambios producidos por los elementos de captura que son causados por los efectos de digitalización. Para este operador, el parámetro P , además del número de vecinos, define los niveles del operador, en el caso de $P = 8$, el valor cada LBP tiene 8-bits, lo que representa 256 niveles y 36 únicos patrones locales de invariantes en su rotación (Ojala, Pietikainen y Mäenpää, 2002). En la figura 7 se ilustran seis tipos de patrones de texturas invariantes en su rotación.

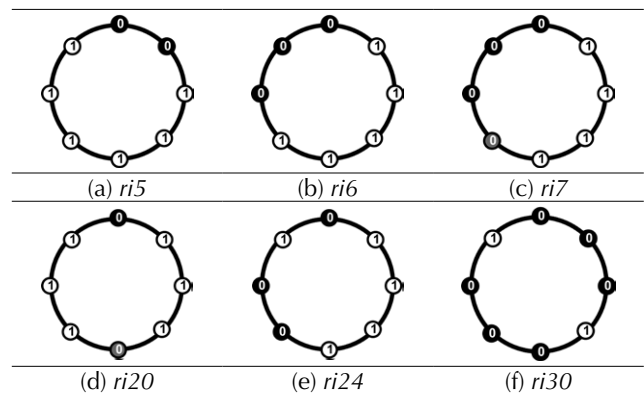


Figura 7. Patrones locales invariantes en la rotación para $P = 8$

Fuente: elaboración propia.

El operador $LBP_{8,R}^{ri36}$ para $P = 8$ se puede representar como un histograma de 36 distribuciones, en donde se resumen las repeticiones de los diferentes patrones $ri36$, matemáticamente se define en la ecuación (5).

$$LBP_{8,R}^{ri36} = \min\{ROR(LBP_{8,R})\} \quad (5)$$

Donde $ROR(LBP_{8,R})$ realiza una rotación bit a bit de cada patrón $ri36$; el número de rotaciones posibles puede variar dependiendo del cada patrón entre 0 a 7. En la figura 8 se observa el funcionamiento para $ri7$.

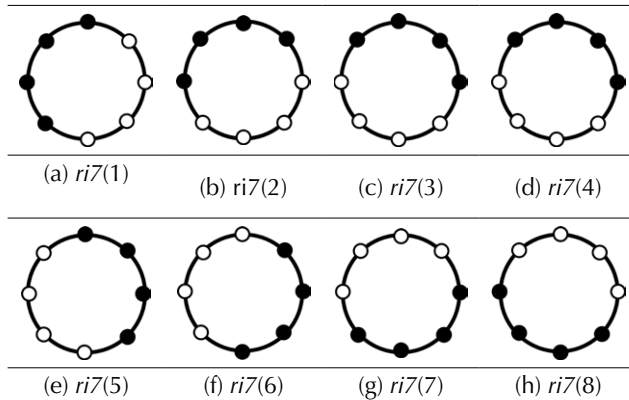


Figura 8. Funcionamiento de $ROR(LBP_{8,R})$ para $ri7$

Fuente: elaboración propia.

El operador $LBP_{8,R}^{ri36}$ posteriormente se le incorpora un concepto adicional de la uniformidad, en donde se realiza una división de los tipos de patrones definidos originalmente en el operador; este establece dos clases (Topi, Timo, Matti y Maricor, 2000): la primera compuesta de 9 texturas que forman un subconjunto de las texturas denotadas como uniformes; el segundo subconjunto conformado por las 27 texturas restantes denominadas *no uniformes*. Esta metodología se considera una descripción robusta y eficiente que puede alcanzar mejores índices de clasificación. Para este operador se obtiene un histograma de 10 distribuciones

las cuales corresponden 9 al primer subconjunto y las restantes 27 a la distribución faltante; el operador LBP invariante en la rotación uniforme se denota en la ecuación (6):

$$LBP_{8,R}^{riu2} = \begin{cases} \sum_{p=0}^{P-1} s(g_c - g_c) 2^p & ri36 \leq 9 \\ 9 & ri36 > 9 \end{cases} \quad (6)$$

MÉTODO DE CLASIFICACIÓN

Para el sistema de clasificación se utiliza el concepto de la distancia de Mahalanobis (1936), que es usado frecuentemente para medir la distancia entre un individuo y el centro de la población de donde procede el individuo. Este concepto permite establecer la semejanza de un individuo con el resto de la población (Mahalanobis, 1936), cada patrón seleccionado aleatoriamente se define como un vector $x_i = (x_{i(1)}, x_{i(2)}, \dots, x_{i(n)})$, para una población con centro $\mu_i = (\mu_{i(1)}, \mu_{i(2)}, \dots, \mu_{i(n)})$, y una matriz de covarianzas Σ .

El sistema propuesto busca establecer si la imagen presenta algún defecto y a qué tipo de defecto corresponde. Las clases establecidas son: (1) sin defecto, (2) barrado, (3) mancha, (4) mariposeo, (5) mota tejida y (6) pique. Al presentar una imagen de entrada aleatoria, el proceso de clasificación consiste en una fase de aprendizaje y una fase de clasificación.

Fase de aprendizaje

Se toman N imágenes que pertenecen a cada clase; a cada imagen se le extrae el vector característico x_i definido por el tipo de técnica de análisis de textura; cada vector se recopila en una matriz M representada en la ecuación (7).

Se le calcula a M el vector de media μ_i y la matriz inversa de covarianza Σ^{-1} para cada clase.

Se almacenan los vectores de media μ_i y la matriz inversa de covarianza Σ^{-1} para cada clase.

$$M(i, j) = \begin{bmatrix} x_i(1,1) & x_i(1,2) & \dots & x_i(1,j) \\ x_i(2,1) & x_i(2,2) & \dots & x_i(2,j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_i(i,1) & x_i(i,2) & \dots & x_i(i,j) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Fase de clasificación

En este paso se realiza también la extracción del vector de características de cada imagen a clasificar x_i .

Se calcula la distancia de Mahalanobis d_i entre el vector de características x_i , el vector media μ_i y la matriz inversa de covarianza Σ^{-1} , en donde obtenemos un vector $D = [d_i(1), d_i(2), d_i(3), d_i(4), d_i(5), d_i(6)]$ que corresponde a las distancias de la imagen de entrada con cada clase.

$$d_i = (x_i - \mu_i)^T \Sigma^{-1} (x_i - \mu_i) \quad (8)$$

Por último, se incorporó un algoritmo de competencia para determinar la pertenencia de los datos a una clase determinada. De esta manera es posible establecer la clase a la que pertenece una imagen para los diferentes tipos de defectos establecidos.

RESULTADOS

Para la validación de los resultados se utilizaron las imágenes de la base de datos *texUAN*, donde 50 % de las imágenes de cada clase son usadas para el entrenamiento, y el porcentaje restante, para la clasificación. Para establecer los porcentajes de acierto se utilizó el concepto de *matriz de confusión* (Umbaugh, 2010) para las seis clases establecidas. En la tabla 3 se muestra la matriz de confusión utilizando el filtro promedio y la técnica $LBP_{8,R}^{ri36}$

Los resultados obtenidos para la técnica de patrones locales binarios (LBP) y sus extensiones se resumen en la tabla 4; las imágenes sin ningún tipo de filtrado, en la tabla 5, y en la tabla 6 se muestran los resultados aplicando los dos tipos de filtrado descritos.

Tabla 3. Matriz de confusión para $LBP_{8,R}^{ri36}$ con filtro espacial

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
C2	0 %	88,4 %	4,8 %	2,0 %	2,8 %	2,0 %
C3	0 %	0 %	84,2 %	6,3 %	8,9 %	0,5 %
C4	0 %	1,4 %	1,4 %	91,4 %	4,3 %	1,4 %
C5	3,3 %	0 %	1,1 %	0 %	94,4 %	1,1 %
C6	0,9 %	0,4 %	2,2 %	0,9 %	5,2 %	90,4 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Resultados LBP sin filtrado.

	$LBP_{8,1}$	$LBP_{8,R}^{ri36}$	$LBP_{8,R}^{riu2}$
C1	42,0 %	99,0 %	82,0 %
C2	13,2 %	89,2 %	66,8 %
C3	37,4 %	86,8 %	67,4 %
C4	30,0 %	81,4 %	31,4 %
C5	46,7 %	90,0 %	77,8 %
C6	57,0 %	94,3 %	47,4 %

Fuente: elaboración propia

Tabla 5. Resultados LBP filtro *wavelet*

	$LBP_{8,1}$	$LBP_{8,R}^{ri36}$	$LBP_{8,R}^{riu2}$
C1	56,0 %	93,0 %	57,0 %
C2	13,2 %	84,2 %	55,2 %
C3	41,6 %	81,6 %	42,1 %
C4	27,1 %	97,1 %	51,4 %
C5	46,7 %	96,7 %	74,4 %
C6	46,1 %	87,4 %	41,4 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Resultados LBP filtro espacial

	$LBP_{8,1}$	$LBP_{8,R}^{ri36}$	$LBP_{8,R}^{riu2}$
C1	55,0 %	100 %	81,0 %
C2	17,2 %	88,4 %	61,6 %
C3	46,8 %	84,2 %	68,4 %
C4	34,3 %	91,4 %	40,0 %
C5	46,7 %	94,4 %	71,1 %
C6	42,2 %	90,4 %	56,1 %

Fuente: elaboración propia.

En el caso de la matriz de co-ocurrencia (GLCM), se analizaron los resultados para las posibles combinaciones de GLCM 0°, GLCM 45°, GLCM 90° y GLCM 135°, y cada uno de estos, para un total 15 posibilidades. En la tabla 7 se muestran las cuatro opciones que presentan mayores porcentajes de acierto, mediante la técnica de filtrado basada en el filtro *wavelet* que presentó mejores resultados para esta técnica.

Tabla 7. Resultados GLCM filtro *wavelet*

	GLCM 90°	GLCM 0°, 90°	GLCM 0°, 45°, 90°	GLCM 0°, 45°, 90°, 135°
C1	63,0 %	67,0 %	79,0 %	79,0 %
C2	38,0 %	47,6 %	58,0 %	70,8 %
C3	50,0 %	63,2 %	61,6 %	66,8 %
C4	52,9 %	58,6 %	77,1 %	80,0 %
C5	41,1 %	84,4 %	87,8 %	89,9 %
C6	63,9 %	74,3 %	83,5 %	87,8 %

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Las técnicas de filtrado utilizadas mejoran el porcentaje de acierto de las técnicas de análisis de textura. Para los patrones locales binarios el filtro promedio y en la matriz de co-ocurrencia el filtro *wavelet*, incrementaron el porcentaje de acierto en la identificación de los defectos en la tela. En la identificación de los diferentes defectos de estudio el filtro *wavelet* aumenta el porcentaje de acierto en la clasificación del mariposeo y la mota tejida, el filtro promedio en imágenes sin defecto, y sin utilizar filtros el barrado, la mancha y el pique.

Para la matriz de coocurrencia se exploraron diferentes alternativas para mejorar el porcentaje de acierto, dentro de las cuales la que mostró mejores resultados de clasificación fue la combinación de las cuatro componentes de GLCM 0°, 45°, 90°, 135°. En resumen, la técnica no resultó ser tan eficiente para detección de los diferentes defectos textiles de las imágenes analizadas.

La derivación original del operador LBP no fue eficiente para la identificación de defectos en textiles debido a que la información recopilada es una descripción general de la textura, y las características de las imágenes de estudio presentan una similitud que no se puede establecer con este método. Por otra parte las extensiones derivadas de LBP^{ri36} y LBP^{riu2} presentaron mejores porcentajes en la clasificación, donde $ri36$ resultó ser la técnica con mejores resultados en la identificación de defectos en textiles, ya que a través de esta se busca caracterizar las texturas uniformes y no uniformes presentes en la imagen.

FINANCIAMIENTO

Este proyecto fue financiado por la Universidad Antonio Nariño en la convocatoria interna para proyectos de investigación.

REFERENCIAS

- Alvarado, J.D. & Fernández, J. (2012). Análisis de textura en imágenes a escala de grises, utilizando patrones locales binarios (LBP). *Revista ENGI 1*(1), 1-6. Recuperado de: http://revistas_electronicas.unicundi.edu.co/index.php/Revistas_electronicas/article/view/5/5
- Che-Seung, C.; Byeong-Mook, C. & Moo-Jin, P. (2005, Aug). Development of Real-Time Vision-Based Fabric Inspection System. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 52(4), 1073-1079. DOI:10.1109/TIE.2005.851648
- Chi-Ho, C. & Pang, G. (1999). Fabric defect Detection by Fourier Analysis. *Industry Applications Conference*, 3, 1743-1750. DOI: 10.1109/IAS.1999.805975
- Fernandez, J. & Alvarado, J.D. (2010). Estudio comparativo de técnicas espaciales para la identificación de defectos en textiles. *ITECKNE 7*(1), 75-82. Recuperado de: <http://revistas.ustabuca.edu.co/index.php/ITECKNE/article/download/354/316>
- Haralick, R.M. (1979). Statistical and Structural Approaches to Texture. *Proceedings of the IEEE* 67(5), 786-804. DOI:10.1109/PROC.1979.11328

- Haralick, R.; Shanmugam, K. & Dinstein, I. (1973). Texture Features for Image Classification. *Systems, Man and Cybernetics, SMC*, 3, 610-621. DOI:10.1109/TSMC.1973.4309314
- Mäenpää, T. (2003). *The Local Binary Pattern Approach to Texture Analysis—Extensions and Applications*. Dissertation, Acta Univ Oul C 187, 78 p + App.: University of Oulu.
- Mahalanobis, P. C. (1936). On the Generalized Distance in Statistics. *Proceedings of the National Institute of Sciences II*(1), 49-55.
- Ojala, T.; Pietikäinen, M. & Harwood, D. (1999). A Comparative Study of Texture Measures with Classification Based on Featured Distributions. *Pattern Recognition* 29(1), 51-59. DOI:10.1016/0031-3203(95)00067-4.
- Ojala, T.; Pietikainen, M. & Maenpaa, T. (2002). Multiresolution Gray-Scale and Rotation Invariant Texture Classification with Local Binary Patterns. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 24(7), 971-987. DOI:10.1109/TPAMI.2002.1017623
- Sungshin, K.; Hyeon, B.; Seong-Pyo, C. & Kwang-Baek, K. (2005). On-line Fabric-Defects Detection Based on Wavelet Analysis. En *ICCSA. Computational Science and Its Applications*, 3483, 1075-1084). Berlín: Springer Berlin Heidelberg. DOI:10.1007/11424925
- Superintendencia de Sociedades. (2013). *Desempeño del sector textil confeccion 2008-2012*. Bogotá D.C.: Delegatura de Asuntos Económicos y Contables, Grupo de Estudios Económicos y Financieros.
- Topi, M.; Timo, O.; Matti, P. & Maricor, S. (2000). Robust Texture Classification by Subsets of Local Binary Patterns. *Pattern Recognition, 2000. Proceedings. 15th International Conference on* 3, 935-938. doi:10.1109/ICPR.2000.903698
- Ullua, A. & Rodríguez, P. (2009). Detección automática de defectos en telas basado en la demodulación AM-FM. *Ibero-American Conference on Trends in Engineering Education and Collaboration*.
- Umbaugh, S. E. (2010). *Digital Image Processing and Analysis: Human and Computer Vision Applications with CVIPtools*. Boca Raton: CRC Press.





Estudio exploratorio del tratamiento de agua de lavado de tintas por método de electrocoagulación/electroflotación

Exploratory Study of Dye Wastewater Treatment through the Electrocoagulation/Electroflotation Method

María Camila García Vaca¹, César Augusto García Ubaque²,
Juan Sebastián de Plaza Solórzano³

Fecha de recepción: 29 de octubre de 2014

Fecha de aceptación: 18 de septiembre de 2015

Cómo citar: García Vaca, M. C., García Ubaque, C. A., & de Plaza Solórzano, J. S. (2016). Estudio exploratorio del tratamiento de agua de lavado de tintas por método de electrocoagulación/electroflotación. *Revista Tecnura*, 20(47), 107-117. <http://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a09>

Resumen

Las aguas de lavado de tinta se catalogan como contaminantes debido a que son sustancias en su mayoría poliaromáticas, carcinogénicas, mutagénicas y teratogénicas para gran variedad de seres vivos. Dentro de los métodos de descontaminación, la electrocoagulación/electroflotación es reconocido como un tratamiento altamente eficiente para la remoción de contaminantes disueltos en agua, y su efecto sobre colorantes ha sido estudiado y descrito. No tiene, sin embargo, aplicación industrial en Colombia en la actualidad y su lugar en los objetivos de investigación académica en el país es aún muy marginal. Por esa razón, este trabajo es un estudio exploratorio del tratamiento de un residuo industrial de tinta de imprenta por medio del método de electrocoagulación/electroflotación. Se aplicó un diseño experimental 2² con un punto central. Se obtuvo un rango de porcentajes de remoción de DQO entre 10,43% hasta 50,93%. No obstante, los resultados

evidencian la posibilidad de que la descontaminación por electrocoagulación puede ser reversible, y no se observa la incidencia esperada de los factores escogidos.

Palabras clave: Electrocoagulación, electroflotación, aguas de lavado de tintas de impresión.

Abstract

Dye wastewater is considered pollutant because it may contain polyaromatic substances known as carcinogenic, mutagenic and teratogenic to a variety of living species. Within the many treatment methods, the electrocoagulation/electroflotation method has been widely studied and it is known to be very effective. However, there is currently no industrial use of it in Colombia, and it is not a priority in academic investigation either. Because of this, this work is an exploratory study of the treatment of printing dye wastewater through the electrocoagulation/electroflotation method. A 2² with a central point experimental

¹ Ingeniera Química, candidata a magister en Ingeniería Química Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. Contacto: mc.garcia149@uniandes.edu.co

² Ingeniero Civil, magister en Ingeniería Ambiental, doctor en Ingeniería. Profesor asociado Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: cagarciau@udistrital.edu.co

³ Ingeniero Civil, estudiante de maestría en Ingeniería Civil. Docente de la Universidad Piloto de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: juan-deplaza@upc.edu.co

design was applied. Removal percentage of OCD (Oxygen Chemical Demand) of the wastewater was obtain between 10,43% and 50,93%. Nevertheless, results show that decontamination through this

treatment method may be reversible, and the expected incidence of factors is not observed.

Keywords: dye wastewater, electrocoagulation, electroflotation.

INTRODUCCIÓN

Se sabe que la mayoría de los colorantes y pigmentos presentes en las tintas artificiales son de naturaleza poliaromática, por sus propiedades de absorción de luz, claves para funcionar como pigmento (Peters, 1995). No obstante, esta característica también convierte a las tintas y a los residuos acuosos de su utilización en factores altamente contaminantes para el medio ambiente, pues tienen conocido efecto carcinogénico, mutagénico y teratogénico para los seres vivos (Daneshvar, Ashassi-Sorkhabi y Tizpar, 2003).

Por esta razón, se han desarrollado diferentes métodos de descontaminación de estos compuestos que pueden clasificarse dentro de varios grupos, por ejemplo: 1) los métodos de oxidación avanzada, entre estos también aquellos asistidos por fotocatalisis (Rojas y Giraldo, 2009a, 2009b; Rojas *et al.*, 2008), que tienen como objetivo la descontaminación directa de los compuestos en solución; 2) métodos de separación de los colorantes contaminantes del agua como: ultra y nanofiltración (Petrinić, Andersen, Šostar-Turk y Marechal, 2007) y métodos de absorción; 3) métodos de coagulación, tanto coagulación química como electrocoagulación; y también 4) métodos de electroflotación y flotación por aire disuelto (DAF).

El principio de la electrocoagulación es que los iones metálicos (tradicionalmente hierro o aluminio), al disolverse del ánodo de sacrificio, inmediatamente forman hidróxidos poliméricos; estos son los agentes coagulantes. Así, el mecanismo de desestabilización de contaminantes, suspensión de partículas y rotura de emulsiones en el proceso de electrocoagulación, se pueden resumir como sigue (Comninellis y Chen, 2010):

1. Compresión de la doble capa difusa alrededor de las especies cargadas por las interacciones de los iones generados por la oxidación del ánodo de sacrificio.
2. Neutralización de la carga de especies iónicas presentes en el agua residual por iones contrarios producidos por la oxidación del ánodo de sacrificio. Esta neutralización favorece la coagulación debido a que disminuye la repulsión electrostática de las partículas.
3. Formación de flóculos, esto es que los flóculos originados por coagulación generan una capa de sedimento fangoso que atrapa o liga partículas coloidales aún disueltas en el medio acuoso.

Adicionalmente, al hidrolizarse el agua, hay generación de burbujas de O_2 y H_2 , que atraen los flóculos y los hacen flotar a la superficie; ese es el principio de la electroflotación. Comparada con técnicas como la flotación por aire disuelto (DAF), que trabaja mediante el mismo principio de llevar flóculos a la superficie con burbujas de gas, se cree que la electroflotación es más eficiente (Szpyrkowicz *et al.*, 2000), por cuanto pueden producirse burbujas de menor tamaño en esta que en aquella, con una mayor área superficial por unidad de volumen, que pueden interactuar con mayor cantidad de flóculos.

Así mismo, se ha señalado la presencia conjunta de las siguientes reacciones en una celda electroquímica (Mohllah *et al.*, 2004):

- a. Reducción catódica de impurezas en el agua.
- b. Descarga y coagulación de partículas coloidales.
- c. Migración electroforética de los iones.
- d. Electroflotación de las partículas coloidales por las burbujas de O_2 y H_2 producidas en los electrodos.

- e. Reducción de iones metálicos en el cátodo.
- f. Otros procesos químicos y electroquímicos.

Por otro lado, se ha propuesto además que la acción descontaminadora de la electrocoagulación, va más allá de una sola separación. En vez de eso, se ha propuesto que el mecanismo primario de descomposición de los tintes es una oxidación homogénea con el “cloruro activo” generado por la electrólisis, en lugar de una descarga de contaminantes en el ánodo (Szpyrkowicz *et al.*, 2000)

Algunas de las ventajas de la electrocoagulación con respecto a la coagulación química son (Comninellis y Chen, 2010):

1. En la coagulación química, la hidrólisis de las sales metálicas usadas como coagulantes lleva a un descenso importante del pH, así que es necesario regular el pH del efluente del proceso, ya que los flóculos son altamente sensibles a las condiciones de medio ácidas; sin embargo, gracias a la hidrólisis en el proceso de electrocoagulación, se lleva a cabo una neutralización casi simultánea del pH de la solución reactante. Esto la hace efectiva en un rango mucho mayor de pH que la coagulación química.
2. Los flóculos generados por electrocoagulación tienden a ser más grandes, con menor contenido de agua y más resistentes a ácidos que aquellos generados por coagulación química, y su remoción se ve facilitada por el proceso de electroflotación.
3. El lodo (sedimento) formado en electrocoagulación es fácilmente descartable, pues está compuesto mayormente de óxidos e hidróxidos metálicos. Sobre todo, la electrocoagulación es una técnica poco productora de lodo.
4. No se requieren condiciones altas de temperatura o turbidez para que el método sea efectivo.

Por supuesto, la electrocoagulación tiene también desventajas que dificultan su aplicación industrial en ciertas partes del mundo, por ejemplo (Comninellis y Chen, 2010): a) los ánodos de

sacrificio que se disuelven en el agua de tratamiento como resultado de la oxidación deben ser reemplazados periódicamente; b) la pasivación de los electrodos con el tiempo; c) se requiere una alta conductividad en el agua residual para el tratamiento con electrocoagulación; d) el costo de la energía eléctrica. Sin embargo, no hay duda de que este fenómeno conjunto de electrocoagulación/electroflotación es un método de descontaminación altamente efectivo para diversos tipos de contaminantes disueltos, no solo colorantes, sino una amplia gama de compuestos orgánicos. Estructuras muy variadas (Pepió y Gutiérrez-Bouzán, 2011) como tartrazina (Modirshahla, Behnajady y Kooshaiian, 2007), cristal-violeta (Bayram y Ayranci, 2010) y benzoquinona1 (Rojas *et al.*, 2008), que forman parte de colorantes, hasta vinazas pueden ser tratadas mediante electrocoagulación/electroflotación para lograr disminución de color (Dávila, Machuca & Marrianga, 2008, 2010). Se ha demostrado, además, que la eficiencia del método no depende de la molécula tratada como de la concentración inicial de esta (Cañizares *et al.*, 2006).

A su vez, se han hecho numerosos estudios del método para establecer las variables que rigen el tratamiento de colorantes específicos. Estas variables son (Daneshvar, Ashassi-Sorkhabi y Tizpar, 2003; Cañizares *et al.*, 2006; Comninellis y Chen, 2010; Can y Bayramoglu, 2010; Pepió y Gutiérrez-Bouzán, 2011):

- Concentración inicial de colorante.
- Conductividad del medio.
- Densidad de corriente.
- Tiempo de tratamiento.
- Agitación.
- Material de los electrodos.
- pH inicial.
- Temperatura inicial.
- Distancia entre los electrodos.
- Arreglo de múltiples electrodos.
- Periodo de inversión de la corriente de la celda electroquímica.

Dependiendo del compuesto específico que se trate, la eficiencia del tratamiento depende en mayor o menor grado del pH o la temperatura. En cuanto al material de los electrodos, existen reportes de un desempeño sobresaliente de la aleación Ti/Pt-Ir (Szpyrkowicz *et al.*, 2000), esto porque los materiales tradicionales, en especial el aluminio, alcanzan estado de pasivación, y otros materiales, como el grafito, no tienen una acción coagulante tan fuerte (Comninellis y Chen, 2010). También, se ha encontrado que el proceso es más eficiente a concentraciones iniciales bajas de colorante (Comninellis y Chen, 2010).

Por otra parte, las diferentes mediciones de descontaminación con las que se evalúa la eficiencia del método proporcionan información acerca de distintos factores de contaminación de los colorantes y las tintas. Por ejemplo, el color del agua contamina por cuanto interfiere en los procesos fotosintéticos de los organismos autótrofos en ecosistemas acuáticos, mientras que el contenido orgánico compite por el oxígeno disuelto, ya que es susceptible de oxidarse, por esto es causante de condiciones sépticas (anaerobias) en fuentes de agua. Así, en literatura se reportan tres clases de mediciones: a) porcentaje de decoloración (o disminución de color), usando espectroscopía en UV visible generalmente; b) demanda biológica y demanda química de oxígeno (DBO y DQO) y contenido orgánico total (COT), y (3) cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC, en inglés). Las medidas de demanda de oxígeno fueron las de verdadero interés en este proyecto; pues son una medida del potencial contaminante de estos compuestos para los ecosistemas acuáticos. Pero ya que no era fácil determinar la biodegradabilidad del residuo de agua, se descartó la medida de DBO. Por eso, se realizaron medidas de DQO para los puntos del diseño experimental ²² que se planteó con las variables que resultaron más representativas según la literatura y las pruebas preliminares. Estas variables son: la cantidad de electrolito en la solución (medido en g de NaCl), que es una condición que influye directamente en la conductividad del medio, y el tiempo de tratamiento (medido en minutos).

EXPERIMENTACIÓN

Materiales y métodos

El agua de residuo de tintas fue proporcionada por la empresa El Periódico, la cual es el residuo producto de la limpieza de las máquinas de impresión: una mezcla de concentración desconocida de diversas tintas de impresión también desconocidas. El volumen de muestra fue 100 ml por cada ensayo.

Como reactor, se utilizaron *beakers* de 200 ml. Debido al volumen disponible dentro del reactor, no se recurrió a dispositivos de agitación que sí están presentes en escalas mayores de un proceso de electrocoagulación/electroflotación.

El electrolito seleccionado fue NaCl, en la forma de sal de mesa comercial de marca Refisal. La cantidad de sal (g) fue medida en una balanza modelo AJ-2200E de Shinko Denshi CO. Ltda., de precisión 0,01 g, y esta variaba según los niveles del diseño experimental (2,50 g y 5,00 g) y el punto central (3,75 g).

Se utilizaron electrodos de aluminio, láminas rectangulares de 16 cm de alto, 4 cm de ancho y 2 mm de grosor, con un área sumergida total de 32 cm² tanto para el cátodo como para el ánodo. Se usó un solo par de electrodos para cada corrida, conservando una distancia de 0,7 cm entre ellos. Debido a que el paso de corriente era bajo, la

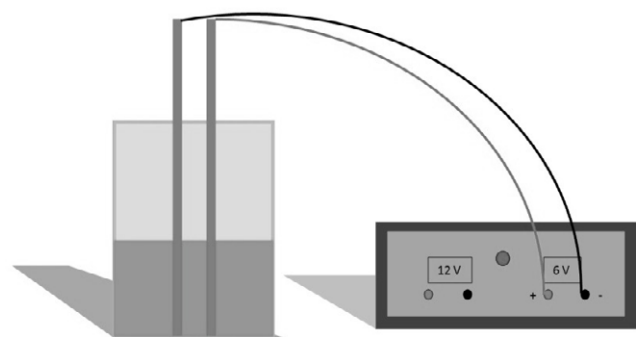


Figura 1. Esquema del montaje experimental

Fuente: elaboración propia

pasivación de los electrodos (Comninellis y Chen, 2010) no era una limitación durante el tiempo de cada ensayo.

Antes de cada corrida, las láminas de aluminio eran pesadas y, a continuación, se sometían a un secado, con el fin de registrar su cambio de masa como efecto de la reacción electrolítica. Este secado se llevó a cabo en horno, a 50 °C y durante 15 minutos.

Luego, los electrodos se conectaban a una fuente de voltaje Kepco MPS-420-M, proporcionada por el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, de la Universidad de los Andes; el voltaje del circuito se fijó en +5V con una corriente de 5 A.

El tiempo durante el cual el paso de corriente estaría activo variaba según los niveles escogidos para el diseño experimental (30 min y 15 min) y el punto central (22,5 min). Este tiempo era medido con un cronómetro, y las acciones sobre el montaje (encendido y apagado de la fuente) eran todas manuales.

Una vez el tiempo de tratamiento se cumpliera para cada corrida, la fuente se apagaba y los electrodos se retiraban, se limpiaban y eran pesados una vez más. También se registró la temperatura inicial de la mezcla reactante y la final con una termocupla.

La mezcla tratada se decantaba y se almacenaba refrigerada a 4 °C por al menos 48 h. Luego, era filtrada por gravedad con papel filtro Whatman Cat N.º 1001 125.

El filtrado era almacenado hasta que todas las muestras estuvieran listas para el análisis de *demanda química de oxígeno*.

Estos análisis se hicieron en las instalaciones del Laboratorio Ambiental del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, de la Universidad de los Andes, para los cuales se tuvo en cuenta el método SM 5220 D acreditado.

El análisis estadístico del diseño experimental se desarrolló por medio del *software Minitab 16*©.

El diseño experimental planteado fue un 2² con 1 punto central (tabla 1) con dos réplicas por punto:

Tabla 1. Combinación de variables y niveles para el diseño factorial 2² con punto central

Punto experimental	Cantidad de NaCl (g)	Tiempo de tratamiento (min)	Notación de Yates [26]
1	5,00	30,0	ab
2	5,00	15,0	a
3	2,50	30,0	b
4	2,50	15,0	(1)
5	3,75	22,5	-

Fuente: elaboración propia

RESULTADOS

Tabla 2. Resultados de DQO para cada una de las muestras analizadas

Punto experimental	DQO (mg/L)		% Disminución de DQO	
	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2
1	3632	2148	15,53	50,05
2	3537	2110	17,74	50,93
3	3860	2262	10,23	47,39
4	2795	2110	35,00	50,93
5	2205	2776	48,72	35,44

Fuente: elaboración propia

Los resultados de DQO para las muestras tratadas se observan en la tabla 2. Las primeras réplicas de los puntos experimentales (columna "Réplica 1" para DQO (mg/L)) tienen lecturas de DQO mayores a las segundas réplicas (columna "Réplica 2"). Estadísticamente, este fenómeno introduce una variabilidad tan grande que los efectos de los factores (cantidad de NaCl en solución y tiempo de tratamiento) son hallados insignificantes según el análisis de Anova (tabla 3 y figura 2). Todos los *p-values*, sin excepción, son mayores que el alfa de 0,05. Además, en la figura 3, en las gráficas de los residuos, se observa un comportamiento claramente alejado de la normalidad. Esto invalida el análisis de Anova en cuanto a constructor de un modelo predictivo de la variable respuesta (Gutiérrez y De la Vara, 2004).

Tabla 3. Anova para resultados de DQO según diseño factorial 2² con punto central

Efectos y coeficientes estimados para DQO (unidades codificadas)					
Término	Efecto	Coef	SE Coef	T	P
Constante	2806,8	308,0	9,11	0,000	
Tiempo de tratamiento	337,5	168,7	308,0	0,55	0,607
Cantidad de NaCl en solución	100,0	50,0	308,0	0,16	0,877
Tiempo de tratamiento*	-271,0	-135,5	308,0	-0,44	0,678
Cantidad de NaCl en solución					
Pt Ctral	-316,2	688,6	-0,46	0,665	
S = 871,060	PRESS = 15174910				
R-cuad. = 12,76 % R-cuad.(pred.) = 0,00 % R-cuad.(ajustado) = 0,00 %					

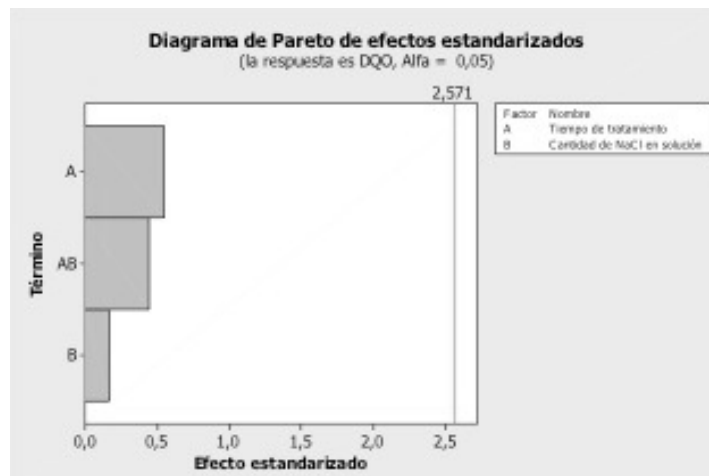


Figura 2. Pareto de efectos para DQO

Fuente: elaboración propia.

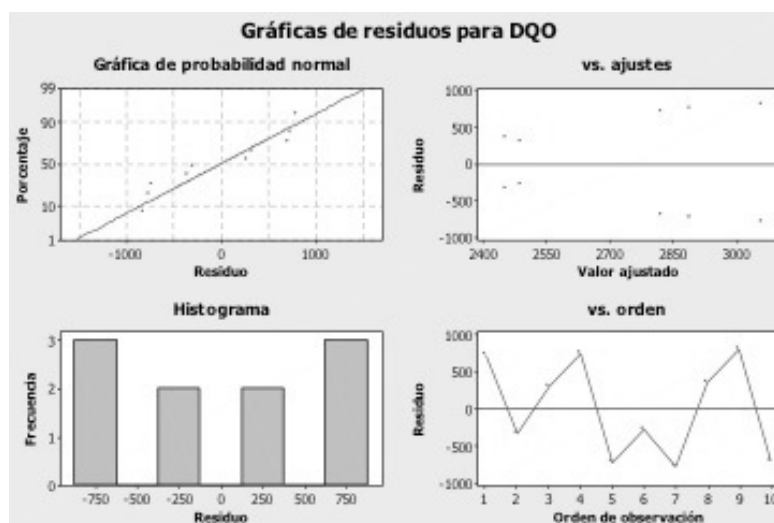


Figura 3. Gráficas de residuos para DQO

Fuente: elaboración propia.

La explicación de este fenómeno puede estar en el funcionamiento del método mismo de DQO. La demanda química de oxígeno no es una medida directa del contenido de materia orgánica de una muestra. Es una medida del oxígeno necesario para oxidar ese contenido orgánico. Se sabe que hay materia orgánica que resiste ese tipo de oxidación y es posible que iones metálicos oxidables como el aluminio, proveniente de los ánodos de sacrificio, pudieran afectarla de estar presentes.

Por otro lado, existe un requerimiento de preservación de una muestra para DQO que se obvió debido a que se descartó su necesidad. Una muestra que vaya a analizarse con DQO debe ser lo más fresca posible y debe estar refrigerada a 4 °C y preservada con ácido sulfúrico para evitar cualquier alteración la muestra, esto porque el DQO es un análisis practicado sobre todo a aguas residuales susceptibles a actividad microbiana. Al no tener en cuenta un análisis de DBO, considerado en un momento debido a su menor costo, ya que la muestra debía ser biodegradable y era una condición que se desconocía, se descartó también cualquier posibilidad de actividad microbiana en las muestras tratadas, y por ende la necesidad de una preservación con ácido sulfúrico. Y ya que las muestras no fueron tratadas simultáneamente, y se debía esperar a que todas estuvieran dispuestas para el análisis de DQO, las muestras que completaron el proceso primero (ser sometidas a electrocoagulación, ser decantadas y ser filtradas), las primeras réplicas, permanecieron más tiempo refrigeradas sin preservación que las últimas, las segundas réplicas.

La manera exacta en la que esto afectó las lecturas de DQO, o cómo preservar con ácido sulfúrico hubiera prevenido esto, no es conocida, sin embargo los resultados parecen apoyar esa tendencia no aleatoria.

Ninguna literatura disponible reporta algo así; por el contrario, se reportan modelos lineales de la descontaminación por electrocoagulación basados en la conductividad del medio y el tiempo de tratamiento (Pepió y Gutiérrez-Bouzán, 2011) estadísticamente aceptables, y también descensos de hasta

85 % en DQO como efecto del tratamiento con electrocoagulación (Comninellis y Chen, 2010).

Ya que el análisis de DQO es una medida global de materia oxidable en una muestra, no es posible saber con exactitud el efecto de una contaminación como la que se produjo o la causa de unos resultados tan atípicos.

Sin embargo, el hecho de que una muestra tratada con electrocoagulación, decantada y filtrada, registre una mayor DQO que una muestra que simplemente se mantuvo refrigerada durante el mismo tiempo, es interesante. Plantea la posibilidad de que el tratamiento de electrocoagulación es de algún modo reversible, es decir, los flóculos de hidróxido polimérico de aluminio son susceptibles de desestabilizarse y aunque en un principio atrapan materia orgánica, pueden, bajo ciertas condiciones, deshacerse y liberar parte de la materia orgánica y además moléculas metálicas de aluminio. El proceso de filtrado al que se sometieron las muestras solo se hizo para separar los flóculos y los sedimentos lodosos que se producen (figura 4, izq.), no para impedir el paso de aluminio disuelto. Así que la presencia de aluminio en los filtrados no se previno.

Cabe anotar que las lecturas más altas de DQO en la tabla 2 corresponden a los puntos experimentales con los niveles más altos de las variables, puntos en los cuales se esperaba una lectura considerablemente más baja de DQO, ya que el proceso es más eficiente con alta conductividad de medio y mayor tiempo de tratamiento según la literatura. Y estas condiciones –alta conductividad y mayor tiempo de tratamiento– originan una mayor disolución del ánodo de sacrificio (tabla 4) y, por tanto, mayor cantidad de aluminio disuelto.

Por lo general, la eficiencia del método de electrocoagulación/electroflotación, aún medida en disminución de DQO, es directamente proporcional a la disolución del ánodo de sacrificio, pues esa es su fuente de agente coagulante. Por eso, al ver el resultado del análisis de Anova para la disminución de masa del ánodo (tabla 5), se observa el comportamiento que se hubiera esperado para las lecturas de DQO de las muestras.

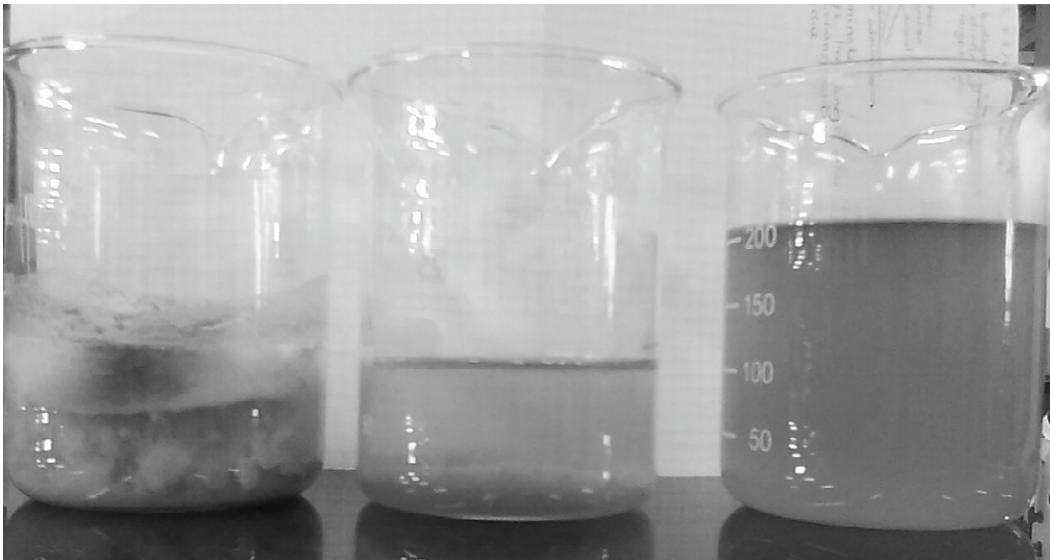


Figura 4. Estado de muestras después del tratamiento, a 25 min (izq.) y 1 min (centro), comparadas con el agua de tintas original (der.)

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Disminución de la masa del ánodo de sacrificio de aluminio durante el tratamiento

Punto experimental	Masa inicial del ánodo (g)	Disminución de masa (g)
1 a	17,11	0,95
1 b	16,78	1,08
2 a	16,89	0,41
2 b	16,82	0,54
3 a	16,70	0,71
3 b	16,79	0,73
4 a	17,03	0,47
4 b	16,94	0,33
5 a	16,57	0,75
5 b	16,85	0,79

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Anova para resultados de disminución de masa del ánodo de sacrificio según diseño factorial 2² con punto central

Efectos y coeficientes estimados para D masa ánodo g (unidades codificadas)					
Término	Efecto	Coef	SE Coef	T	P
Constante	0,65250	0,02632	24,80	0,000	
Tiempo de tratamiento	0,43000	0,21500	0,02632	8,17	0,000
Cantidad de NaCl en solución	0,18500	0,09250	0,02632	3,52	0,017
Tiempo de tratamiento*	0,11000	0,05500	0,02632	2,09	0,091
Cantidad de NaCl en solución					
Pt Ctral	0,11750	0,05884	2,00	0,102	
S = 0,0744312		PRESS = 0,1108			
R-cuad. = 94,59 % R-cuad. (pred.) = 78,37 % R-cuad.(ajustado) = 90,27 %					

Es evidente el efecto significativo de ambos factores (figura 5), que coincide con lo reportado en literatura (Comninellis y Chen, 2010, Pepió y Gutiérrez-Bouzán, 2011).

Los residuales no presentan un comportamiento normal para esta variable respuesta (figura 6), pero esta variabilidad podría haberse corregido con un número mayor de réplicas.

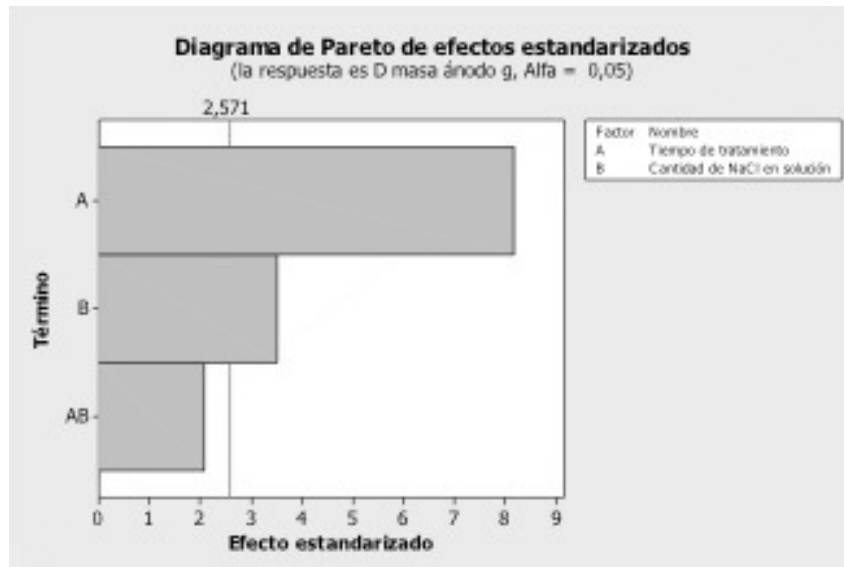


Figura 5. Pareto de efectos para disminución de masa del ánodo de sacrificio

Fuente: elaboración propia.

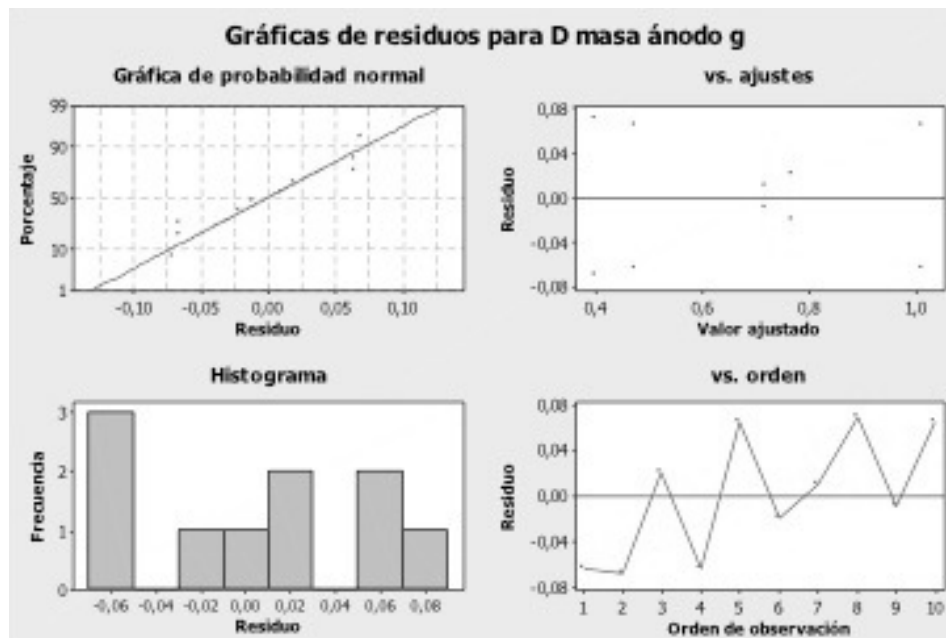


Figura 6. Gráfica de residuos para disminución de masa del ánodo de sacrificio

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Los resultados de DQO no fueron los esperados debido a los porcentajes de remoción obtenidos en los niveles probados. Este hecho evidencia la posibilidad de que el proceso de descontaminación por electrocoagulación pueda ser reversible con el tipo de ánodos que se acondicionaron para este fin, ya que en los puntos experimentales donde se esperaba una lectura más baja de DQO se obtuvieron valores más altos.

Esto puede indicar que al desestabilizarse los flóculos; el aluminio proveniente del ánodo de sacrificio que se utilizó como agente coagulante en el agua tratada está siendo liberado; y al ser tan oxidable este metal, puede ser la causa de la contaminación de las lecturas de *demanda química de oxígeno*.

Un factor adicional que puede ser causante de la liberación del ion aluminio es la disminución del pH que no fue evaluado durante la etapa experimental.

Es recomendable, para estudios futuros, corroborar este hecho y acompañar el seguimiento del proceso de electrocoagulación con registros de pH, para establecer si puede llegar a incidir en la eficiencia de esta técnica y, de ser necesario, utilizar soluciones *buffer* que permitan mantener estable el pH.

El comportamiento esperado y la incidencia de los factores escogidos para el diseño pueden verse en la medida de la disminución de masa del ánodo de sacrificio.

REFERENCIAS

- Bayram, E. & Ayranci, E. (2010). Electrochemically Enhanced Removal of Polycyclic Aromatic Basic Dyes from Dilute Aqueous Solutions by Activated Carbon Cloth Electrodes. *Environmental Science & Technology Environ. Sci. Technol.*, 44 (16), 6331-6336.
- Can, O. & Bayramoglu, M. (2010). The Effect of Process Conditions on the Treatment of Benzoquinone Solution by Electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 173 (1-3), 731-736.
- Cañizares, P.; Gadri, A.; Lobato, J.; Nasr, B.; Paz, R.; Rodrigo, M. & Saez, C. (2006). Electrochemical Oxidation of Azoic Dyes with Conductive-Diamond Anodes. *Industrial & Engineering Chemistry Research Ind. Eng. Chem. Res.*, 45 (10), 3468-3473.
- Cañizares, P.; Martínez, F.; Lobato, J. & Rodrigo, M. A. (2006) Electrochemically Assited Coagulation of Wastes Polluted with Eriochrome Black T. *Industrial & Engineering Chemistry Research Ind. Eng. Chem. Res.*, 45 (10), 3474-3480.
- Cerqueria, A., Russo, C., & Marques, M. R. C. (2008). Electroflocculation for Textile Wastewater Treatment. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 26 (4), 659-668.
- Chen, X., Chen, G., & Yue, P. L. (2002). Novel Electrode System for Electroflotation of Wastewater. *Environmental Science and Technology*, 36 (4), 778-783.
- Comninellis, C. & Chen, G. (2010). *Electrochemistry for the environment*. Nueva York: Springer.
- Daneshvar, N.; Ashassi-Sorkhabi, H. & Tizpar, A. (2003). Decolorization of Orange II by Electrocoagulation Method. *Separation and Purification Technology*, 31 (2), 153-162.
- Dávila, J. A., Machuca, F. & Marrianga, N. (2008). Reducción de demanda química de oxígeno, carbono orgánico total y sólidos totales en vinazas mediante electro- flotación/oxidación. *Revista de Ingeniería e Investigación*, 29 (1), 35-38.
- Dávila, J.; Machuca, F. & Marrianga, N. (2010). Peroxidación y electroflotación de vinazas de destilaría. *Rev. Ing.*, 32., 38-44.
- Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, Ministerio de Desarrollo Económico, República de Colombia (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico*, Sección II: Tratamiento de aguas residuales.
- Gutiérrez, H. & De la Vara, R (2004). *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A.
- Hernlem, B. J., & Tsai, L. S. (2000). Chlorine Generation and Disinfection by Electrocoagulation. *Journal of Food Science*, 65 (5), 834-837.
- Modirshahla, N.; Behnajady, M. & Kooshaiian, S. (2007). Investigation of the Effect of Different Electrode

- Connections on the Removal Efficiency of Tartrazine from Aqueous Solutions by Electrocoagulation. *Dyes and Pigments*, 74 (2), 249-257.
- Mollah, M.; Morkovsky, P.; Gomes, J.; Kesmez, M.; Parga, J. & Cocke, D. (2004). Fundamentals, Present and Future Perspectives of Electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 114 (1-3), 199-210
- Mu, Y., Rabaey, K., Rozendal, R., Yuan, Z., & Keller, J. (2009). Decolorization of Azo Dyes in Bioelectrochemical Systems. *Environmental Science & Technology Environ. Sci. Technol.*, 43 (13), 5137-5143.
- Norma Técnica Colombiana NTC 5167 de 2004.
- Pepió, M, & Gutiérrez-Bouzán, M. (2011). Empirical Models for the Decoloration of Dyes in an Electrochemical Batch Cell. *Industrial & Engineering Chemistry Research Ind. Eng. Chem. Res.*, 50(15), 8965-8972.
- Peters, A., & Freeman, H. S. (1995). *Modern colorants: Synthesis and structure*. Glasgow, Great Britain: Blackie Academic and Professional.
- Petrinić, I.; Andersen, N.; Šostar-Turk, S. The Removal of Reactive Dye Printing Compounds Using Nanofiltration. *Dyes and Pigments*, 74 (3), 512-518.
- Rojas, J. & Giraldo, L. (2009a). Empleo del reactivo de Fenton para la degradación del colorante Tartrazina. *Revista Lasallista de Investigación*, 6 (1), 27-34.
- Rojas, J. & Giraldo, L. (2009b). Mineralización del colorante tartrazina mediante un proceso de oxidación avanzada. *Revista Lasallista de Investigación*, 6 (2), 46-53
- Rojas, J.A.; Giraldo, L.G.; Ruiz, A.A.; López, C.A. & Rivera, C. M. (2008). Degradación del colorante tartrazina mediante fotocátalisis heterogénea empleando lámpara de luz ultravioleta. *Producción Más Limpia* 3(2), 37-47.
- Szpyrkowicz, L.; Cherbanski, R. & Kelsall, G. (2005). Hydrodynamic Effects on the Performance of an Electrochemical Reactor for Destruction of Disperse Dyes. *Industrial & Engineering Chemistry Research Ind. Eng. Chem. Res.*, 44 (7) 2058-2068.
- Szpyrkowicz, L.; Juzzolino, C.; Kaul, S.; Daniele, S. & Faveri, M. (2000). Electrochemical Oxidation of Dyeing Baths Bearing Disperse Dyes. *Industrial & Engineering Chemistry Research Ind. Eng. Chem. Res.*, 39 (9), 3241-3248.
- Szpyrkowicz, L. (2005). Hydrodynamic Effects on the Performance of Electro-coagulation/Electro-flotation for the Removal of Dyes from Textile Wastewater. *Industrial & Engineering Chemistry Research Ind. Eng. Chem. Res.*, 44 (20), 7844-7853.





Tomografía computarizada: proceso de adquisición, tecnología y estado actual

Computed tomography: acquisition process, technology and current state

Óscar Javier Espitia Mendoza¹, Yuri Hercilia Mejía Melgarejo², Henry Arguello³

Fecha de recepción: 10 de marzo de 2015

Fecha de aceptación: 18 de septiembre de 2015

Cómo citar: Espitia Mendoza, Ó. J., Mejía Melgarejo, Y. H., & Arguello Fuentes, H. (2016). Tomografía computarizada: proceso de adquisición, tecnología y estado actual. *Revista Tecnura*, 20(47), 119-135. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a10

Resumen

La tomografía computarizada (CT) es una técnica de escaneo no invasivo ampliamente aplicada en sectores como la medicina, la industria y la geología. Esta técnica permite la reconstrucción tridimensional de la estructura interna de un objeto que es iluminado con una fuente de rayos-X. La reconstrucción se forma con imágenes bidimensionales de cortes transversales del objeto. Cada corte se obtiene a partir de las medidas de fenómenos físicos como la atenuación, la dispersión y la difracción de los rayos-X, como resultado de la interacción con el objeto. En general, la adquisición de las medidas se realiza con métodos basados en alguno de estos fenómenos y empleando diversas arquitecturas clasificadas en generaciones. Por otro lado, en respuesta a la necesidad de simular sistemas de adquisición para CT se ha desarrollado software dedicado a esta tarea. El objetivo de este artículo es determinar el estado actual de las técnicas de CT, para esto, se presenta una revisión de los métodos, las distintas arquitecturas usadas para la adquisición y algunas

de sus aplicaciones. Adicionalmente, se presentan los resultados de simulaciones realizadas. Las principales contribuciones de este trabajo son la descripción detallada de los métodos de adquisición y la presentación de las posibles tendencias de la técnica en general.

Palabras clave: imágenes médicas, métodos de adquisición, rayos-X, tomografía computarizada.

Abstract

Computed tomography is a noninvasive scan technique widely applied in areas such as medicine, industry, and geology. This technique allows the three-dimensional reconstruction of the internal structure of an object which is lighted with an X-rays source. The reconstruction is formed with two-dimensional cross-sectional images of the object. Each cross-sectional is obtained from measurements of physical phenomena, such as attenuation, dispersion, and diffraction of X-rays, as result of their interaction with the object. In general, measurements acquisition is performed with methods based on any

¹ Ingeniero de Sistemas, estudiante de Maestría en Ingeniería de Sistemas e Informática de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Contacto: oscar.espitia@saber.uis.edu.co

² Ingeniera Electrónica, magíster en Ingeniería Electrónica, estudiante de doctorado en Ingeniería Electrónica de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Contacto: yuri.yejia@saber.uis.edu.co

³ Ingeniero Electricista, magíster en Potencia Eléctrica, doctor Electrical and Computer Engineering. Profesor titular de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Contacto: henarfu@uis.edu.co

of these phenomena and according to various architectures classified in generations. Furthermore, in response to the need to simulate acquisition systems for CT, software dedicated to this task has been developed. The objective of this research is to determine the current state of CT techniques, for this, a review of methods, different architectures used for

the acquisition and some of its applications is presented. Additionally, results of simulations are presented. The main contributions of this work are the detailed description of acquisition methods and the presentation of the possible trends of the technique.

Keywords: computed tomography, X-ray, X-ray acquisition methods, medical imaging.

INTRODUCCIÓN

La tomografía computarizada (CT, por su sigla en inglés) es una tecnología establecida para obtener imágenes, de forma no invasiva, de la estructura interna de los objetos en tres dimensiones (3D) (Russo, Lauria, Mettievier y Montesi, 2008). Las tomografías se obtienen a partir de proyecciones bidimensionales usando rayos-X. CT es considerada de gran importancia debido a que brinda mejores posibilidades de diagnóstico que otros métodos como la radiología convencional (Lewitt, Member, Matej y Member, 2003); además sus aplicaciones abordan diversas áreas de investigación en la actualidad (Maire y Withers, 2014; Mayo *et al.*, 2002; Jian *et al.*, 2009; Vontobel, Lehmann y Carlson, 2005; Barroso, Lopes, De Jesus y Oliveira, 2001).

El diagnóstico por medio de rayos-X ha sido utilizado durante más de 50 años; los primeros acercamientos a CT pueden ligarse al procedimiento de tomosíntesis analógica, que existe desde 1920 (Gehrke y Wirth, 2005; Levakhina, 2013). Sus raíces se encuentran en el descubrimiento de los rayos-X en 1895, por Wilhelm Conrad Röntgen, quien logró obtener la primera visión de la composición interna de un objeto. En 1917, Radon describió de forma matemática la reconstrucción de un objeto desde sus proyecciones. A partir de dichos eventos, la exploración mediante CT se ha convertido en uno de los métodos de diagnóstico por imágenes más utilizado (Lewitt, Member, Matej y Member, 2003; Buzug, 2007).

Debido a que con CT convencional no siempre se logran imágenes del contraste deseado, se

desarrollan métodos de adquisición que basan sus principios en las diferentes características de los rayos-X. El método tradicional de CT, conocido como CT de transmisión (*transmission CT*), se basa en la obtención de la atenuación de los rayos al traspasar un objeto (Webb, 1987). CT de contraste de fase (*phase contrast CT*) se fundamenta en la adquisición de la medida de los cambios de fase de un haz de rayos-X al pasar a través de un objeto (Bronnikov, 2006). CT de dispersión (*scattering CT*) consiste en la reconstrucción de la distribución de la densidad de electrones en un objeto a partir de la medida de la dispersión dentro de un rango angular (Cong y Wang, 2011). CT de difracción (*Diffraction CT*) tiene en cuenta propiedades de difracción de los rayos-X (Westmore y F'enster, 1995). CT de doble energía (*Dual energy CT*) considera la medición de los diferentes valores de atenuación dados por la proyección de rayos-X con distinta energía (Johnson, 2012). Recientemente se ha desarrollado la técnica de muestreo compresivo, la cual se ha aplicado a CT convencional y compone un método conocido como CT compresiva (*compressive CT*) (Zhu, Wahid y Babyn, 2012).

Con el fin de explotar la técnica y reducir tiempos de adquisición, se han desarrollado siete generaciones de escáneres. Esta clasificación se da a partir de la disposición de los componentes y el movimiento mecánico necesario para recopilar datos. Las generaciones denotan el orden en que se han introducido los diseños; sin embargo, el número de la generación no implica que un sistema sea superior a otro (Goldman, 2007; Ghonge, 2013).

En medicina, CT se ha utilizado con éxito por más de cuatro décadas. Además, durante varios años ha ayudado a los ingenieros en ensayos no destructivos de componentes fabricados o en el estudio de diferentes materiales. Recientemente se han desarrollado trabajos de investigación que se enfocan en incluir la técnica de CT en ciencia de los materiales, geología e industria (Mayo *et al.*, 2002; Cong y Wang, 2011; Cho *et al.*, 2012; Lima *et al.*, 2009).

El objetivo de esta investigación es determinar las tendencias y el estado actual de las técnicas de CT, para lo cual se presenta una revisión de los métodos de adquisición, se describe la tecnología usada en las generaciones, las diversas aplicaciones y se muestran los resultados de simulaciones correspondientes a los dos generaciones de CT. Para especificar los resultados del trabajo se plantea la siguiente estructura en el documento: la sección "Métodos de adquisición" detalla la arquitectura y el modelo para adquisición de proyecciones en cada método de adquisición CT; la sección "Generaciones CT" describe los aspectos físicos de las generaciones de CT; la sección "Reconstrucción" menciona generalidades sobre reconstrucción; la sección "Aplicaciones CT" presenta algunas aplicaciones actuales de CT; la sección "Casos de prueba" muestra las simulaciones para el método tradicional de CT, y por último, se plantean las conclusiones.

MÉTODOS DE ADQUISICIÓN

En los últimos años se han desarrollado formas de medir los cambios de intensidad usando rayos con diferente energía e instrumentos ópticos que modulan los haces, en busca de mejor calidad y reducción de la dosis. Además, algunas propiedades físicas de los rayos-X, como la dispersión y difracción, se han tenido en cuenta en las medidas. En las siguientes subsecciones se presentan los principales métodos de adquisición de imágenes tomográficas basados en estos conceptos.

CT de transmisión

La figura 1 muestra la discretización de un objeto Q iluminado con luz de rayos-X desde la fuente S . Esta representación está compuesta por voxeles que forman Q_1 secciones transversales, cada una con dimensiones superficiales $Q_2 \times Q_3$. A cada voxel (de dimensiones $d_x \times d_y \times d_z$) se le asigna una atenuación μ .

Considerando un rayo de intensidad I_0 , que atraviesa el objeto con una distribución no homogénea de atenuaciones $\mu(x)$, la intensidad del rayo $I(x)$ medida por el detector D depende tanto de la distancia atravesada x , como de la atenuación $\mu(x)$ de cada punto en su trayectoria. Esto puede modelarse con la ecuación (1).

$$I(x) = I_0 e^{-\int_L \mu(x) dx} \quad (1)$$

Este fenómeno obedece a la ley de Lambert Beer, y puede reescribirse a partir de la ecuación (2).

$$-\ln\left(\frac{I(x)}{I_0}\right) = \int_L \mu(x) dx \quad (2)$$

La ecuación (2) se describe como la fracción de luz transmitida a través del objeto y puede asignarse a una proyección unidimensional, captada con respecto a un ángulo de incidencia. La reconstrucción consiste en estimar la distribución de los coeficientes de atenuación $\mu(x)$ (Buzug, 2007).

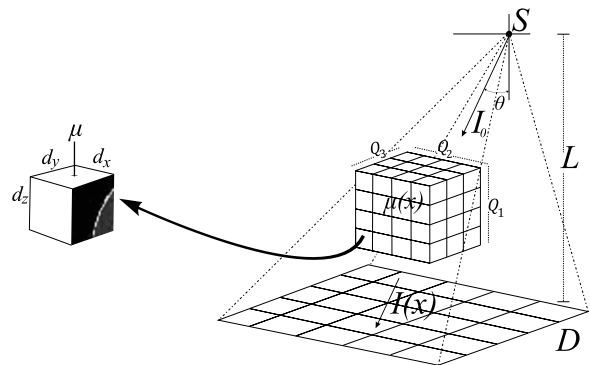


Figura 1. Esquema de escaneo para CT de transmisión

Fuente: elaboración propia.

CT de contraste de fase

Cuando la luz atraviesa un objeto, no solo cambia su intensidad, sino también su fase. Los rayos-X pueden ser tratados como ondas electromagnéticas. Entonces, un objeto se describe por medio de su índice de refracción $n = 1 - \delta + i\beta$. El término δ corresponde al decremento de la parte real del índice de refracción y la parte imaginaria β describe el índice de absorción. Mediante el uso de estos componentes, el cambio de intensidad se puede expresar a partir de la ecuación (3),

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\frac{4\pi\beta Q_1}{\lambda}, \quad (3)$$

Donde λ es la longitud de onda de la radiación. El cambio de fase $d\theta$ está dado por la ecuación (4).

$$d\theta = \frac{2\pi\delta Q_1}{\lambda}, \quad (4)$$

Donde Q_1 es el espesor de la muestra. Cuando los rayos-X pasan a través de objetos con regiones de diferente densidad y composición, su atenuación se escribe a partir de la ecuación (5).

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\frac{4\pi}{\lambda} \int \beta dx, \quad (5)$$

Donde la integración se hace a lo largo de la trayectoria de los rayos-X. Por otro lado, el desplazamiento de fase $d\theta$, causado por la muestra, se escribe como la ecuación (6).

$$d\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \int \delta dx. \quad (6)$$

Esta expresión representa la proyección de la parte real del índice de refracción. La diferencia entre las dos ecuaciones anteriores está en δ y β . Por tanto, la reconstrucción en CT de contraste de fase puede realizarse de la misma manera que en CT convencional, mediante la información de cambio de fase (Yoneyama, Yamada y Takeda, 2011).

Este método es el resultado de los esfuerzos para combinar las imágenes de contraste de fase con CT (Li, Zhu y Sun, 2012), las reconstrucciones obtenidas proporcionan la distribución de la densidad de electrones del objeto (Bronnikov, 2006). En la actualidad, existen principalmente tres clases de CT de contraste de fase (Jian, 2012). La tabla 1 muestra las clases de sistemas de CT de contraste de fase.

Tabla 1. Sistemas de contraste de fase

Sistema	Descripción	Esquema
Imagen basada en analizador (ABI)	Consta de un cristal asimétrico, un cristal analizador y un detector. Los haces emitidos desde la fuente S son monocromatizados y ampliados horizontalmente para irradiar el objeto directamente. La luz de rayos-X que logra atravesar la muestra es difractada por el cristal analizador y se mide en el detector D (Jian, 2012; Vine et al., 2012)	
Imagen basada en propagación (PBI)	Depende de franjas de interferencia que surgen en la propagación en el espacio libre en el régimen de Fresnel. Sin embargo, no son una medida directa de la fase. En este caso, no hay ningún dispositivo óptico adicional, la fuente de rayos-X debe ser coherente y se necesita un detector de alta resolución para observar las franjas. Se debe tomar una serie de imágenes a diferentes distancias de propagación, con el fin de determinar de forma inequívoca la fase del frente de onda (Jian, 2012; Li, Li y Diao, 2008), como se muestra en el esquema, a la derecha.	

Sistema	Descripción	Esquema
Imagen basada en rejillas (GBI)	La rejilla G_0 que se ubica en la fuente convierte el haz de rayos-X incoherente en una serie de haces individuales que son espacialmente coherentes. La rejilla de fase G_1 divide cada haz en dos fuera de fase, así interfieren unos con otros. El patrón de interferencia puede ser muestreado mediante la traducción de la rejilla de absorción G_3 que se ubica justo en frente del detector (Jian, 2012; Revol <i>et al.</i> , 2010).	

Fuente: elaboración propia.

CT de difracción

CT de difracción se basa en las propiedades de difracción de los rayos-X, es decir, en la medida de la desviación de los rayos cuando interactúan con un objeto. Con esta técnica se puede hacer una discriminación selectiva de los elementos que componen una muestra escaneada, mediante la fijación del ángulo de Bragg que produzca un pico de interferencia (Barroso *et al.*, 2000). El diferencial de dispersión de una sección transversal está dado por la ecuación (7).

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{coherente} = \frac{r_e^2}{2}(1 + \cos^2(\theta)) F^2(q, Z), \quad (7)$$

Donde r_e es el radio del electrón $2,82 \times 10^{-15}$ [m], θ es el ángulo de difracción, $F(q, Z)$ es el factor de forma atómico, $q = \sin(\theta/2)/\lambda$ es la transferencia de energía cinética. El ángulo θ entre el haz primario y el haz difractado es el denominado ángulo de Bragg. La figura 2 muestra un esquema del escaneo en CT de difracción.

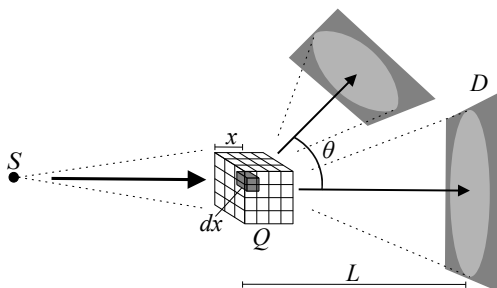


Figura 2. Esquema de escaneo para CT de difracción

Fuente: elaboración propia.

La radiación difractada, desde el elemento dx del objeto Q en la posición x , que se capta por el i -ésimo elemento del detector puede expresarse mediante la ecuación (8).

$$dN = N_0 T_p(x) n_0 \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{total}(x, q) \Delta\Omega_i(\theta, x) T_s(x) dx + M \quad (8)$$

Donde N_0 es el número de fotones que inciden sobre el objeto, $T_p(x)$ es la transmisión de haz primario a dx , n_0 es el número de centros de difracción por unidad de volumen en x , $(d\sigma/d\Omega)_{total}$ es la dispersión coherente e incoherente de la sección transversal por unidad de volumen y por centro de difracción, q representa la transferencia de momento para el elemento de objeto en x , $\Delta\Omega_i(\theta, x)$ es el ángulo sólido del detector i , $T_s(x)$ la transmisión del haz difractado desde x hasta el detector y M el componente de difracción múltiple. Es posible reconstruir las imágenes tomográficas, basadas en patrones de difracción, con una serie de supuestos simplificadores (Westmore y Fenster, 1995; Westmore, Fenster y Cunningham, 1997; Beath y Cunningham, s.f.).

CT de dispersión

Después de que un haz de rayos-X interactúa con los elementos internos de los tejidos, algunos fotones serán desviados de la dirección de desplazamiento original (figura 3), fenómeno denominado *dispersión de fotones*. La dirección y la intensidad de los fotones dispersados están directamente relacionados con la distribución de densidad de

electrones dentro del tejido. CT de dispersión consiste en la reconstrucción de la distribución de la densidad de electrones en un objeto, por medio de la dispersión medida dentro de un rango angular específico (Cong y Wang, 2011; Yuasa *et al.*, 2002; Alpuche, Pistorius, Gordon y Elbakri, 2011).

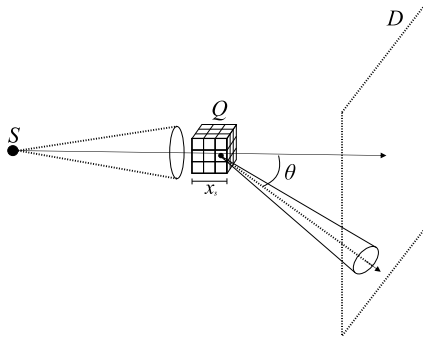


Figura 3. Esquema de escaneo para CT de dispersión

Fuente: elaboración propia.

La intensidad de dispersión de rayos-X en la posición x del detector se describe a partir del diferencial de dispersión de fotones en una sección transversal (ecuación (9)).

$$D(x) \int_L I(x_s) \rho(x_s) \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{total} (\theta) e^{-\int_0^1 \mu(x_s) dx_s} \cos \theta dx_s, \quad (9)$$

Donde L es la distancia de la fuente hasta el objeto, θ es el ángulo de dispersión que está dado por $\theta = \cos^{-1}(x - x_s)v / \|x - x_s\|$, v es la dirección del rayo y $\rho(x_s)$ es la densidad del electrón en la posición x_s . Por tanto, la energía de dispersión total, E_{dt} , adquirida por un detector puede ser formulada a partir de la ecuación (10).

$$E_{dt} = \int D(x) dx. \quad (10)$$

CT de doble energía (DECT)

Las interacciones entre los rayos-X, con energía fotónica entre 30 keV y 200 keV, y la materia están dominadas por la dispersión Compton y el efecto fotoeléctrico. Estos últimos son dependientes tanto

de los materiales como de la energía y cada uno de ellos se modela a partir de la ecuación (11).

$$\mu(x, y, z, E) a_c(x, y, z) f_{KN}(E) a_p(x, y, z) f_p(E), \quad (11)$$

Donde (x, y, z) son las coordenadas de la muestra, $\mu(x, y, z, E)$ es la atenuación total, E es la energía incidente, $a_c(x, y, z)$ es el coeficiente de Compton, $a_p(x, y, z)$ es el coeficiente fotoeléctrico, $f_{KN}(E)$ es el diferencial de dispersión de Compton o dispersión incoherente y $f_p(E)$ se aproxima a la dependencia de energía de la interacción fotoeléctrica (ecuación (12)).

$$f_p(E) = E^{-3}. \quad (12)$$

Los coeficientes son funciones de las propiedades físicas de los materiales, como la masa, la densidad y el número atómico. Un escáner de CT de doble energía obtiene dos conjuntos de proyecciones logarítmicas descritas en las ecuaciones (13) y (14).

$$P_L = \ln \left[\int S_L(E) e^{-A_p f_p(E) - A_c f_{KN}(E) dE} \right] \ln \int S_L(E) dE \quad (13)$$

y

$$P_H = \ln \left[\int S_H(E) e^{-A_p f_p(E) - A_c f_{KN}(E) dE} \right] + \ln \int S_H(E) dE \quad (14)$$

Donde P_L y P_H corresponden a las proyecciones con baja y alta energía, respectivamente, $A_c = \int a_c(x, y, z) d(x, y, z)$ y $A_p = \int a_p(x, y, z) d(x, y, z)$, $S_L(E)$ y $S_H(E)$ son los espectros de rayos-X incidentes de baja y alta energía, respectivamente (Ying, Z.; Naidu, R. & Crawford, 2006; Zhang *et al.*, 2013). En general, las proyecciones se adquieren mediante tres mecanismos: DECT de conmutación rápida de kilovoltaje, donde la fuente varía la energía de radiación dentro de un rango definido; DECT de doble fuente, en el cual se usan dos fuentes independientes para cubrir el campo de visión desde dos puntos distintos; y DECT de detector multicapa, que posee dos capas de detectores con diferente sensibilidad (Johnson, 2012; Kaza *et al.*, 2012). En la figura 4 se muestra un esquema de los sistemas mencionados.

$$P_L P_H A_c \int a_c(x, y, z) d(x, y, z) A_p \int a_p(x, y, z) d(x, y, z), S_L S_H$$

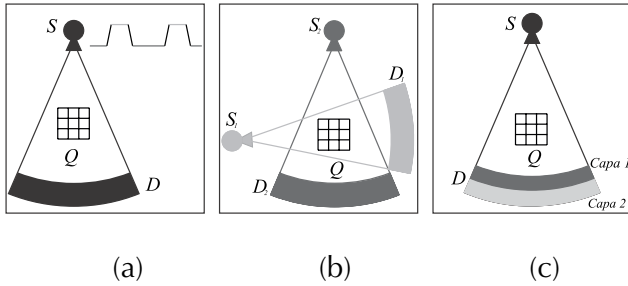


Figura 4. Esquemas de escaneo para DECT. (a) DECT de conmutación rápida de kilovoltaje. (b) DECT de doble fuente. (c) DECT de detector multicapa

Fuente: elaboración propia.

CT compresiva

El muestreo compresivo (CS de su sigla en inglés) es una nueva teoría para adquirir y reconstruir señales (Donoho, 2006). A diferencia del proceso de adquisición de señales tradicional, la teoría de CS permite que las señales compresibles sean muestreadas a una frecuencia cercana a su tasa de información intrínseca, que está muy por debajo de la tasa de Nyquist (Shannon, 1998). CS se fundamenta en dos condiciones: a) que las señales digitales sean dispersas y b) la incoherencia de la matriz de medición (Wakin, 2008).

Se dice que una imagen es dispersa si la mayoría de sus elementos están cerca o son iguales a cero. Asumiendo un proceso de medición lineal que calcula $M \ll N$ productos internos entre f y una colección de vectores $\{\phi_j\}_{j=1}^M$ como $y_i = \langle f, \phi_j \rangle$ (ecuación (15)).

$$y = \Phi f, \quad (15)$$

Donde el conjunto de proyecciones y_i forman el vector y de M elementos, Φ es la matriz de medición con dimensiones $M \times N$, con filas ϕ_j^T y f es la señal de rayos-X original. Teniendo en cuenta la reconstrucción de f a partir de y , se sabe que existen infinitas soluciones para la ecuación (15), porque la dimensionalidad de y es mucho menor que la de f .

Un requisito clave para la aplicación de la teoría de CS es que la imagen sea dispersa. Muchas de las señales de la naturaleza se pueden volver dispersas adoptando una transformación adecuada con un número pequeño de coeficientes (Candès, Romberg y Tao, 2006; Sevak, Thakkar, Kher y Modi, 2012).

Matemáticamente, una señal discreta $f \in \mathbb{R}^n$ puede ser expresada a partir de la ecuación (16).

$$f = \Psi x, \quad (16)$$

Donde x es la secuencia de coeficientes de f y la base Ψ es una matriz con columnas ϕ_1, \dots, ϕ_G . Claramente, f y x son representaciones equivalentes de la misma señal, f es una combinación lineal de apenas F vectores base, con $F \ll G$ (Shannon, 1998), (Wakin, 2008). De acuerdo con las ecuaciones (15) y (16) se obtiene la ecuación (17).

$$y = \Phi f = \Phi \Psi x = \Theta x. \quad (17)$$

CS se ha usado como base para la reconstrucción en CT de transmisión y de dispersión (Bronnikov, 2006; Choi y Brady, 2009; Yu y Wang, 2009; Chen *et al.*, 2012). Una forma de implementar la teoría de CS en una configuración de CT de transmisión es incluir elementos en el sistema que permitan codificar las medidas para tomar muestras comprimidas. Estos elementos pueden ser aperturas codificadas, debido a los efectos que tienen sobre la luz (Galvis, Mejía y Argüello, 2014; Candès y Tao, 2006). Las aperturas codificadas corresponden a arreglos bidimensionales con patrones de materiales opacos a la luz, las secciones que no contienen material opaco definen su transmitancia, es decir, la fracción de luz que puede atravesarlas (MacCabe, Holmgren, Tornai y Brady, s.f.; Choi y Brady, 2009). En la figura 5 se muestra un esquema de un sistema de muestreo para CT con la inclusión de las aperturas codificadas T^1 y T^2 , que modulan los haces proyectados desde las fuentes S_1 y S_2 y hacia un plano de múltiples detectores que miden la atenuación generada por un objeto Q . $T^1 T^2 S_1 S_2$

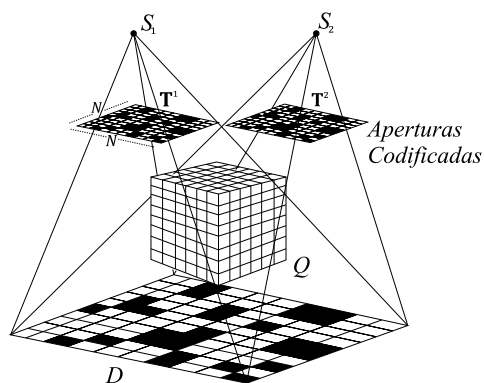


Figura 5. Esquema de escaneo para CT compresiva

Fuente: elaboración propia.

Este método se ha introducido con ventajas en cuanto a los tiempos de adquisición y dosis de radiación. Con un sistema de CS para CT, se reducen las medidas y el tiempo para tomarlas, lo que significa que un objeto bajo estudio se expone a una cantidad menor de radiación (Choi y Brady, 2009).

GENERACIONES DE CT

Un sistema de CT posee dos piezas claves: una fuente de rayos-X y un detector o arreglo de detectores. En las fuentes se producen fotones con alta energía por medio de aceleración y desaceleración de electrones. Por otro lado, los detectores miden la cantidad de luz que pasa a través del objeto bajo estudio. Las fuentes, por lo general, son tubos de rayos-X. Sin embargo, existen trabajos y aplicaciones en las que se usa el sincrotrón. Actualmente, los detectores son de estado sólido, analógicos o digitales, usan celdas electrónicas y fotodiodos para hacer conteo de fotones. El desarrollo tecnológico referente a CT se ha enfocado en estas dos piezas específicamente, así que sus características definen cada generación (Shefer et al., 2013).

Previo a la introducción de la tecnología de los escáneres CT se estableció la tomosíntesis, una técnica tomográfica que produce un conjunto de imágenes de cortes transversales apilados, a partir

de un número limitado de proyecciones, con bajas dosis de radiación, adquiridas dentro de un campo angular limitado (Dobbins, 2009). En la figura 6 se muestra la geometría de un escáner de tomosíntesis.

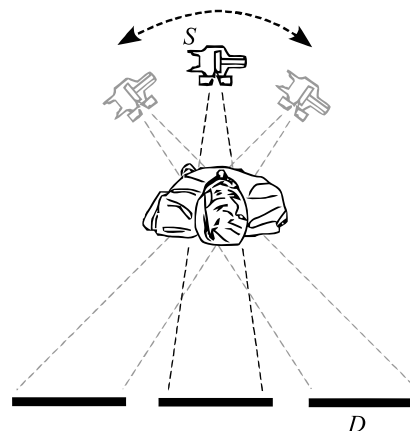


Figura 6. Geometría de un escáner de tomosíntesis

Fuente: elaboración propia.

Años después, en la década de 1970 se impulsó el desarrollo de tecnologías que mejoraran el alcance de esta técnica, punto de partida para las denominadas generaciones CT. En tabla 2 se presentan los principales aspectos de cada generación y la descripción de la geometría correspondiente.

En los últimos años se han desarrollado formas de medir los cambios de intensidad usando múltiples fuentes e instrumentos ópticos que modulan los haces, en busca de mejor calidad y reducción de la dosis.

Recientemente se han propuesto sistemas basados en la influencia del número de fuentes de rayos-X sobre las reconstrucciones de CT. Por ejemplo, los sistemas *Pioneering Dynamic Spatial Reconstructor of Mayo Clinic* (Wang, Yu De Mann, 2008), *Line Sources CT* (Bharkhada y Yu, 2009), *Inverse-Geometry CT* y *Ultimately a Rebirth of Stationary CT* (Niemi, Lassas y Siltanen, 2013) poseen múltiples fuentes de rayos-X distribuidas de diversas maneras. El uso de más de una fuente permite disminuir el tiempo de adquisición de los datos, y por tanto, reducir la dosis de radiación. Aunque

Tabla 2. Generaciones de CT

Generación	Esquema	Características
Primera generación (1G) (1970)		Una fuente con su haz restringido a una línea delgada y un detector que se mueven alrededor de un área circular que contiene al objeto. Ventaja: el detector no capta la radiación dispersa. Desventaja: el número de proyecciones implica prolongados tiempos de adquisición. (Webb, 1987; Prince y Links, 2005).
Segunda generación (2G) (1972)		Una fuente emite un haz en forma de abanico hacia un vector de detectores, cada detector está restringido a medir la radiación proveniente de la dirección correspondiente. Ventaja: los detectores no captan la radiación dispersa. Desventaja: el número de proyecciones implica prolongados tiempos de adquisición (menores que los de escáneres 1G). (Goldman, 2007; Prince y Links, 2005).
Tercera generación (3G) (1978)		Una fuente que emite un haz en forma de abanico que cubre toda la región de escaneo desde una sola posición hacia un vector con un gran número de detectores, restringidos como los de 2G. Ventaja: requiere poco movimiento, entonces hay una reducción en el tiempo de adquisición. (Webb, 1987; Goldman, 2007; Prince y Links, 2005).
Cuarta generación (4G) (1978)		Una fuente rotatoria y un anillo de detectores estáticos. Ventaja: el área de detección es muy amplia. Desventaja: existen problemas por la dispersión, debido a que los detectores no están restringidos. (Prince y Links, 2005).
Quinta generación (5G) (1979)		Un arreglo de detectores permanece estacionario, mientras que un haz de electrones de alta energía se dispersa electrónicamente a lo largo del ánodo semicircular de tungsteno. Ventaja: se reduce el tiempo de adquisición. Desventaja: el campo de visión está limitado por el semicírculo. (Webb, 1987; Prince y Links, 2005).
Sexta generación (6G) (1987)		Anillo de deslizamiento en un sistema que puede girar continuamente alrededor de un área móvil que contiene al objeto. Ventaja: la adquisición de datos es continua y en un corto lapso. Desventaja: los datos se guardan como un patrón helicoidal y no hay secciones transversales completas disponibles. (Goldman, 2007; Prince y Links, 2005).
Séptima generación (7G) (1998)		Una matriz de múltiples detectores y una fuente de rayos-X que emite haces en forma de cono. Ventaja: un escáner 7G puede adquirir una gran cantidad de información en un tiempo muy corto. Desventaja: requiere un nivel mucho más alto en el proceso de reconstrucción, con respecto a las demás generaciones. (Seeram, 2008).

Fuente: elaboración propia.

los desarrollos en tecnologías de adquisición se han centrado en los sistemas de detección, se espera que los próximos avances se enfoquen en el uso de múltiples fuentes de rayos-X.

RECONSTRUCCIÓN

El problema de la reconstrucción consiste en calcular la estructura del objeto bajo estudio a partir de las medidas de intensidad, determinadas por el efecto fotoeléctrico, la dispersión y la difracción. La adquisición de los datos deja como resultado una matriz conocida como sinograma, de la cual se obtiene una imagen bidimensional correspondiente a un corte transversal. Existen métodos analíticos o iterativos esta tarea. Los métodos analíticos comprenden herramientas matemáticas propias del análisis de Fourier como el teorema de proyecciones y la convolución; entre estos se encuentran la retroproyección y la retroproyección filtrada (FBP). Los métodos iterativos incluyen el método algebraico y los métodos estadísticos (Buzug, 2007).

APLICACIONES DE CT

CT es considerada una tecnología avanzada que tiene una amplia aplicación en la medicina. Ha permitido ensayos no destructivos en otras áreas como la geología, la ingeniería y la industria. A continuación, se resaltan las generalidades sobre las aplicaciones en estas áreas. Su selección se debe al impacto que tienen y al interés que han despertado en diversos sectores de Colombia.

Medicina

En medicina, CT es un procedimiento aceptado para diagnóstico, guía en procedimientos o monitoreo de la efectividad de los tratamientos para enfermedades como el cáncer (Uriondo, Garc, Deustotech-life y Avda, 2011; Kapadia *et al.*, 2008). Mediante escáneres CT se obtienen imágenes de

alto contraste en las que es posible identificar traumas óseos o tumores y estudiar órganos en tiempo real. En la actualidad, CT se usa en procedimientos como fluoroscopia, imágenes y visualización 3D, angiografía e imágenes cardíacas.

La fluoroscopia es un procedimiento de diagnóstico en el que se estudian las estructuras del cuerpo en movimiento en tiempo real, esto se logra con una tasa de procesamiento muy alta (Goldman, 2007; Su *et al.*, 2013). La visualización 3D es una técnica de CT usada en planeación de tratamientos, imágenes craneofaciales, planeación de cirugías y ortopedia (Geng y Member, 2008). La angiografía es la CT de los vasos sanguíneos, opacados por medios de contraste, en este procedimiento se escanea el área de interés durante la inyección de contraste y las imágenes se registran cuando los vasos están completamente opacados para mostrar la condición arterial o venosa (Ning *et al.*, 2000). Con el desarrollo de escáneres que reducen los efectos del movimiento continuo del corazón se logran imágenes cardíacas, dando amplias posibilidades de diagnóstico de enfermedades (Liu, Member, Fernando y Sinusas, 2006).

Recientemente, CT se usa para obtener imágenes de las personas sanas, como un medio para la detección temprana de enfermedades. Este concepto se conoce como *CT screening* y es investigado como una herramienta potencial para obtener imágenes de individuos asintomáticos (Seeram, 2008).

Geología

Aunque CT fue introducido como un procedimiento médico, se ha reconocido su uso en otras áreas como geología e ingeniería. Las primeras aplicaciones incluyen estudios en los campos de la ciencia del suelo, meteoritos, paleontología, geotecnia y la geología del petróleo. En la actualidad, se usa CT de alta resolución (micro y nano CT) (Ketcham y Carlson, 2001) en la inspección de muestras geológicas para la exploración de recursos.

Los sistemas CT de alta resolución proporcionan imágenes tridimensionales a nivel microscópico de las muestras. En la ciencia del suelo, las muestras son escaneadas para visualizar estructura, componentes o raíces, por ejemplo, para optimización de cultivos o productividad (Taina, Heck, Deen y Ma, 2013). CT se aplica a muestras de meteoritos con el fin de determinar características como la edad y su composición química (Ketcham y Carlson, 2001). También, se considera una técnica que brinda amplias posibilidades para estudiar fósiles (Vontobel, Lehmann y Carlson, 2005). Por otro lado, se usa para el análisis cualitativo y cuantitativo de las características internas de los materiales asfálticos y cementos en el área de la geotecnia (Hu *et al.*, 2012). En la geología del petróleo es un importante avance en este momento en países como Colombia. Este procedimiento ayuda a revelar los detalles de la estructura interna de los poros de una roca petrolífera y a comprender las condiciones que afectan la producción del hidrocarburo (Riepe y Suhaimi, 2011; Knackstedt *et al.*, 2013).

Industria

En la industria, CT se ha usado por varios años en ensayos no destructivos de los elementos fabricados. Uno de los usos más estudiados en la actualidad se relaciona con los sistemas de detección de explosivos. También se ha investigado en el estudio de materiales fabricados y manejo de residuos peligrosos.

En los aeropuertos se usan escáneres de CT para explorar el equipaje y detectar explosivos a partir de la densidad, masa y otras propiedades de los objetos en el interior de los contenedores (Ying, Naidu y Crawford, 2006; Gang y Yi, 2009). Por otra parte en las grandes fábricas se usa el escaneo en control de calidad, ya que con CT es posible hacer estudios no destructivos de los productos fabricados (Gehrke y Wirth, 2005; Malcolm, Liu, Ng y Teng, 2013). Por último, ha sido aplicado en el manejo de residuos peligrosos, como herramienta

para determinar condiciones del contenido de los recipientes en que se depositan desechos que emiten radiación (Bernardi y Martz, 1995).

La figura 7 muestra tres ejemplos de tomografías: a) una imagen cardíaca (Chong y Essue, 2010), b) la reconstrucción de los poros de un núcleo de granito (UGCT, 2015) y c) el modelo tridimensional obtenido del escaneo de un microchip (UGCT, 2015). Estas imágenes corresponden a resultados de investigaciones en medicina, geología e industria, respectivamente.

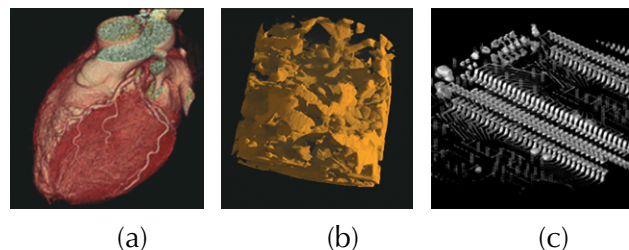


Figura 7. Modelo tridimensional de tomografía. (a) Imagen cardíaca (tomada de Chong y Essue, 2010). (b) Núcleo de granito (tomada de UGCT, 2015). (c) Microchip

Fuente: UGCT (2015).

En la tabla 3 se presenta un resumen de los métodos de adquisición y sus respectivas aplicaciones.

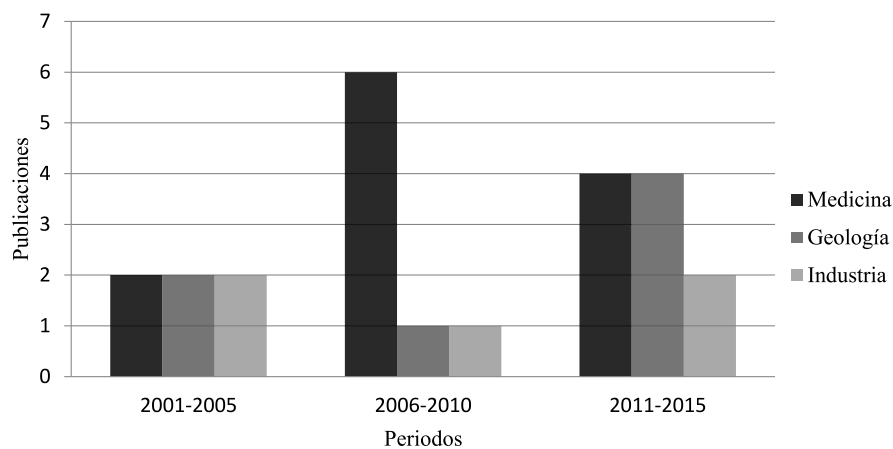
CT es aplicada ampliamente y se posiciona como uno de los procedimientos radiológicos más usados e investigados en la actualidad para ensayos no destructivos. Por otro lado, el método de transmisión es el más explotado, esto quizá se deba a que corresponde al método tradicional. Además, el área de la que más datos de investigaciones se tienen es la medicina.

En la figura 8 se muestra el comportamiento de la literatura referente a aplicaciones de CT en las áreas mencionadas anteriormente en los últimos 15 años, el máximo de publicaciones por año es seis y el mínimo es uno. Se evidencia un mayor número de publicaciones en aplicaciones médicas y es posible inferir un creciente auge de la aplicación de la técnica en geología.

Tabla 3. Comparación de los diferentes métodos de adquisición en CT y sus aplicaciones

Método CT	Descripción	Aplicaciones
Transmisión	Estimación de la estructura espacial a partir de las medidas de atenuación.	Medicina (Goldman, 2007; Uriondo <i>et al.</i> , 2011; Kapadia <i>et al.</i> , 2008; Darshini y Karandharaj, 2014; Su <i>et al.</i> , 2013; Liu <i>et al.</i> , 2006). Control de calidad (Gehrke y Wirth, 2005; Malcolm <i>et al.</i> , 2013). Manejo de residuos peligrosos (Bernardi y Martz, 1995). Estudio de suelos (Taina <i>et al.</i> , 2013; Knackstedt <i>et al.</i> , 2013).
Contraste de fase	Estimación de la estructura espacial a partir de las medidas de los cambios de fase transformados en variaciones de intensidad.	Estudios médicos (Bronnikov, 2006). Estudio de rocas (Mayo <i>et al.</i> , 2002). Estudio de materiales (Jerjen <i>et al.</i> , 2011)
Dispersión	Reconstrucción de la distribución de densidad de electrones en un objeto a partir de la medida de dispersión dentro de un rango angular definido.	Estudios médicos (Alpuche <i>et al.</i> , 2011). Estudio de materiales cristalinos (Lu <i>et al.</i> , 2006). Detección de enfermedades (Changizi <i>et al.</i> , 2005).
Difracción	Discriminación selectiva de un elemento a partir de la medida de su interferencia.	Medicina (Westmore y Fenster, 1995; Schlomka <i>et al.</i> , 2003; Pani <i>et al.</i> , 2010). Biomédica (Barroso <i>et al.</i> , 2000). Materiales (Barroso <i>et al.</i> , 2001).
Doble energía	Reconstrucción de la distribución espacial de varios objetos a partir de las medidas de atenuación de haces con diferente energía.	Detección de explosivos (Ying, Naidu y Crawford, 2006; Gang y Ji, 2009). Materiales (Gehrke y Wirth, 2005). Medicina (Johnson <i>et al.</i> , 2007).

Fuente: elaboración propia.

**Figura 8.** Comportamiento de la literatura respecto a aplicaciones de CT en los últimos quince años

Fuente: elaboración propia.

CASOS DE PRUEBA

Dentro del *software* para simulaciones de CT se destacan las herramientas de Astra, un paquete del *software* Matlab de código abierto desarrollado

para tomografía (Astra Tomography Toolbox, s.f.). Este permite simular el procedimiento con distintas geometrías, correspondientes a las generaciones. Está basado en el método de transmisión, debido a que se reconstruye la estructura espacial

mediante la estimación de coeficientes de atenuación a partir de medidas de intensidad. Por último, Astra contiene los algoritmos de reconstrucción mencionados en la sección "Reconstrucción".

El trabajo de la herramienta comienza con la generación de datos sintéticos que corresponden al objeto a escanear y la definición de la geometría de proyección. Con esta información se calculan las proyecciones y se genera el sinograma. Adicionalmente, se definen las dimensiones, distancias, los ángulos de proyección y el tipo de algoritmo de reconstrucción. La figura 9 muestra un ejemplo de una simulación realizada con dos geometrías, la geometría en paralelo y la geometría en abanico. Las imágenes de muestra tienen dimensiones de 128 por 128 píxeles, 256 detectores, 500 ángulos y un rango de 360 grados para el desplazamiento de la fuente. La (a) presenta una imagen fantasma (*phantom*), usada tradicionalmente para representar el objeto escaneado en CT; la (b) y (c) ilustran los sinogramas correspondientes a los experimentos simulados con geometrías en paralelo y en abanico, respectivamente; las (d) y (e) muestran los resultados de la reconstrucción, realizada con el algoritmo FBP para cada experimento.

Una herramienta para expresar resultados de forma cuantitativa es el cálculo del PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*). La diferencia entre las reconstrucciones de las figuras 9(d) y 9(e) se calcula con el PSNR, que es de 27,81 y 32,47 [dB], respectivamente. Esto se debe a la cantidad de

medidas por ángulo. Mientras se mide una proyección lineal con una arquitectura en paralelo, se toman varias proyecciones del mismo tipo con una configuración en abanico. Por tanto, se espera que la reconstrucción con la configuración en abanico sea mejor, lo que se verifica con los valores de PSNR obtenidos.

CONCLUSIONES

CT es una herramienta importante en varias áreas de investigación. Como se mostró en esta revisión, desde los años 1970, el uso de rayos-X en ensayos no destructivos está envuelto en una continua evolución, que comprende aspectos físicos, algorítmicos y tecnológicos.

Este avance se da como respuesta a las necesidades generadas por el uso de la técnica, como por ejemplo disminuir los tiempos de adquisición y aumentar el nivel de detalle en las reconstrucciones. Una de las preocupaciones latentes es la dosis de radiación. Para responder a esta preocupación se ha investigado un nuevo método de adquisición usando la teoría de muestreo compresivo. Además de establecer el estado actual del CT, en esta revisión se presentan los primeros trabajos enfocados en la técnica de muestreo compresivo aplicada al método tradicional.

CT se ha destacado como un procedimiento médico, sin embargo, como se detalló en este trabajo, se evidencia su impacto en la industria y

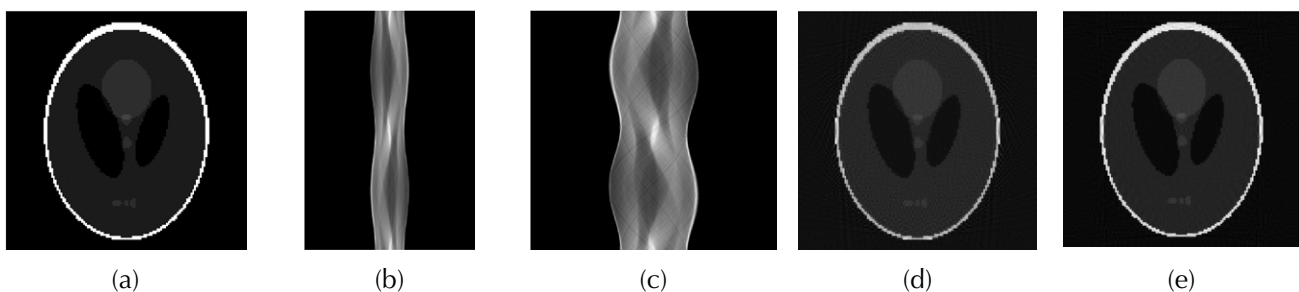


Figura 9. Simulación CT. (a) Imagen fantasma de referencia. (b) Sinograma geometría en paralelo. (c) Sinograma geometría en abanico. (d) Reconstrucción con geometría en paralelo. (e) Reconstrucción con geometría en abanico

Fuente: elaboración propia.

en la geología. Se espera que parte de las próximas investigaciones en CT estén dedicadas a estas áreas. Por otro lado, Aunque los desarrollos en tecnologías de adquisición se han centrado en los sistemas de detección, se espera que los próximos avances se enfoquen en el uso de múltiples fuentes de rayos-X.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander por apoyar este trabajo registrado bajo el proyecto “Diseño y simulación de una arquitectura de tomografía computarizada para el censado compresivo de imágenes de rayos-X” (código VIE 1803).

REFERENCIAS

- Alpuche, J.E.; Pistorius, S.; Gordon, R. & Elbakri, I.A. (2011). A Novel Hybrid Reconstruction Algorithm for First Generation Incoherent Scatter CT (ISCT) of Large Objects with Potential Medical Imaging Applications. *Journal of X-Ray Science and Technology* 19(1), 35-56.
- Astra Tomography Toolbox (s.f.). *A High-Performance GPU MATLAB Toolbox for 2D and 3D Tomography*. Recuperado de: <http://sourceforge.net/p/astra-toolbox/wiki/Introduction/>
- Barroso, R.C.; Lopes, R.T.; De Jesus, E.F.O. & Oliveira, L.F. (2001). X-Ray diffraction Microtomography Using Synchrotron Radiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 471(2), 75-79.
- Barroso, R.C.; Lopes, R.T.; Jesus, E.F.O.; De Oliveira, L.F. & Description, A.B. (2000). Synchrotron Biomedical Applications Using X-Ray Diffraction Tomography. En: *IEEE Conference Record, Nuclear Science Symposium 2*, 855-859. Seattle, WA.
- Beath, S.R. & Cunningham, I.A. (s.f.) (2009). Pseudo-Monoenergetic X-Ray Diffraction Measurements Using Balanced Filters for Coherent-Scatter Computed Tomography. *Medical Physics* 36(5), 1839-1847.
- Bernardi, R.T. & Martz, H. E. (1995). Nuclear Waste Drum Characterization with 2 MeV X-Ray and Gamma-Ray Tomography. *Proc. SPIE 2519, X-Ray and Ultraviolet Sensors and Applications*, 140. DOI:10.1117/12.211897.
- Bharkhada, H. & Yu, H.L. (2009). Line-source based X-ray tomography. *International Journal of Biomedical Imaging*. DOI:10.1155/2009/534516.
- Bronnikov, A.V. (2006). Phase-Contrast CT: Fundamental Theorem and Fast Image Reconstruction Algorithms. *SPIE, Developments in X-Ray Tomography*, 63180Q, DOI:10.1117/12.679389.
- Buzug, T.M. (2007). *Computed Tomography: From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT*. Berlín-Heidelberg: Springer Verlag.
- Candes, E.J. & Tao, T. (2006). Near-Optimal Signal Recovery From Random Projections: Universal Encoding Strategies? *IEEE Transactions on Information Theory* 52(12), 5406-5425.
- Candès, E.J.; Romberg, J. & Tao, T. (2006). Robust Uncertainty Principles: Exact Signal Reconstruction From Highly Incomplete Frequency Information. *IEEE Transactions on Information Theory* 52(2), 489-509.
- Changizi, V., Oghabian, M. A., Speller, R., Sarkar, S., & Kheradmand, A. A. (2005). Application of Small Angle X-ray Scattering (SAXS) for Differentiation between Normal and Cancerous Breast Tissue. *Int J Med Sci* 2(3), 118-121.
- Chen, J.; Member, S.; Cong, J.; Vese, L.A. & Villasenor, J. (2012). A Hybrid Architecture for Compressive Sensing 3-D CT Reconstruction. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems* 2(3), 616-625.
- Cho, M.K.; Youn, H.; Jang, S.Y.; Lee, S.; Han, M.C. & Kim, H.K. (2012). Digital Tomosynthesis in Cone-Beam Geometry for Industrial Applications: Feasibility and Preliminary Study. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 13(9), 1533-1538.
- Choi, K. & Brady, D.J. (2009). Coded Aperture Computed Tomography. En: *Proc. SPIE 7468, Adaptive*

- Coded Aperture Imaging, Non-Imaging, and Unconventional Imaging Sensor Systems*, 74680B. DOI:10.1117/12.825277.
- Chong, J. & Essue, J. (2008). Innovations in Cardiac Computed Tomography: Cone Beam CT/Volume CT and Dual Source CT. *UWOMJ* 77(2), 6-11.
- Cong, W. & Wang, G. (2011). X-Ray Scattering Tomography for Biological Applications. *J. Xray. Sci. Technol.* 19(2), 219-227.
- Darshini P., and Karandharaj, P. (2014). Medical image processing schemes for cancer detection: A survey. In *International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering* (pp. 1-6).
- Dobbins, J.T. (2009). Tomosynthesis Imaging: At a Translational Crossroads. *Medical Physics* 36(6), 1956-1967. DOI:10.1118/1.3120285.
- Donoho, D.L. (2006). Compressed Sensing. *IEEE Transactions on Information Theory* 52(4), 1289-1306.
- Galvis, D.F.; Mejía, Y.H. & Argüello, H. (2014). Efficient Reconstruction of Raman Spectroscopy Imaging Based on Compressive Sensing. *DYNA* 81(118), 116-124.
- Gang, T. & Ji, F.D. (2009). The Research & Application of the Detection Capability of Dangerous Goods in Dual-Energy X-Ray Security Equipment. In *IEEE International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation 2*, 352-355. DOI: 10.1109/ICICTA.2009.321.
- Gehrke S. & Wirth, K.E. (2005). Application of Conventional- and Dual-Energy X-Ray Tomography in Process Engineering. *IEEE Sens. J.* 5(2), 183-187.
- Geng, J. & Member, S. (2008). Volumetric 3D Display for Radiation Therapy Planning. *Journal of Display Technology* 4(4), 437-450.
- Ghonge, N.P. (2013). Computed Tomography in the 21st Century : Current Status & Future Prospects. *JIMSA* 26(1), 35-42.
- Goldman, L.W. (2007). Principles of CT and CT Technology. *J. Nucl. Med. Technol.* 35(3), 115-28.
- Hu, C.; Youtcheff, J.; Wang, D.; Zhang, X.; Kutay, E. & Thyagarajan, S. (2012). Characterization of Asphalt Mixture Homogeneity Based on X-ray Computed Tomography. *Journal of Testing and Evaluation* 40(7), 1103-1111.
- Jerjen, I.; Revol, V.; Kottler, C. & Kaufmann, R. (2011). The Benefits and Challenges of Differential Phase Contrast Imaging for Material Science. *International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography* (pp. 1-8). Berlín.
- Jian F., (2012). Phase Contrast Computed Tomography, Computed Tomography-Clinical Applications. En: L. Saba (ed.). *InTech*.
- Jian, F.; Bin, L.; Hao, Z.; Xingyu, Z.; Zhenggan Z. & Dongbo, W. (2009). X-Ray Phase-Contrast Imaging Methods for Biological Structures. En: *BMEI '09. 2nd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics* (pp. 1-3). DOI: 10.1109/BMEI.2009.5305651.
- Johnson, T. (2012). Dual-Energy CT: General Principles. *AJR. Am. J. Roentgenol* 119(5), S3-8.
- Johnson, T. R. C., Krauss, B., Sedlmair, M., Grasruck, M., Bruder, H., Morhard, D. ... Becker, C. R. (2007). Material differentiation by dual energy CT: initial experience. *European Radiology* 17(6), 1510-1517.
- Kapadia, A.J.; Sharma, A.C.; Tourassi, G.D.; Bender, J.E.; Howell, C.R.; Crowell, A.S. & Floyd, C.E. (2008). Neutron Stimulated Emission Computed Tomography for Diagnosis of Breast Cancer. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 55(1), 501-509.
- Kaza, R.; Platt, J.; Cohan, R.; Caoili, E.; Al-Hawary, M. & Wasnik, A. (2012). Dual-Energy CT with Single- and Dual-Source Scanners : Current Applications in Evaluating the Genitourinary Tract. *Radiographics* 32(2), 353-69.
- Ketcham, R.A. & Carlson, W.D. (2001). Acquisition, Optimization and Interpretation of X-Ray Computed Tomographic Imagery: Applications to the Geosciences. *Computers & Geosciences* 27(4), 381-400.
- Knackstedt, M., Carnerup, A., Golab, A., Sok, R., Young, B., & Riepe, L. (2013). Petrophysical Characterization of Unconventional Reservoir Core At Multiple Scales. *Petrophysics* 54(3), 216-223.
- Levakhina, Y. (2013). *Three-Dimensional Digital Tomosynthesis. Iterative Reconstruction, Artifact Reduction and Alternative Acquisition Geometry*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Lewitt, R.M.; Member, S.; Matej, S. & Member, S. (2003). Overview of Methods for Image Reconstruction

- From Projections in Emission Computed Tomography. *Proceedings of the IEEE* 91(10), 1588-1611.
- Li, J.; Zhu, P. & Sun, Y. (2012). An Approximate Reconstruction Method for Helical Cone-Beam Differential Phase-Contrast Computed Tomography Images. *Physics in Medicine and Biology* 57(8), 2347-2356.
- Li, T.T.; Li, H. & Diao, L.H. (2008). Cone-Beam Tomography of Propagation-Based Imaging. *Applied Physics Letters*, 93, 221114-221114-3.
- Lima, I.; Assis, J.T.; Apoloni, C.R.; Mendonca de Souza, S.M.; Duarte, M. E. & Lopes, R.T. (2009). Non-Destructive Imaging Materials Investigation by Microfocus 3D X-Ray Computed Tomography. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 56(3), 1448-1453.
- Liu, Y.; Member, S.; Fernando, G.P. & Sinusas, A.J. (2006). A New Method for Hot-Spot Quantification of Hybrid SPECT / CT Cardiac Images : Methodology and Preliminary Phantom Validation. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 53(5), 2814-2821.
- Lu, Y., Longman, E., Davis, K. G., Ortega, Á. J., Grossmann, G., Michaelsen, T. E., ... Harding, S. E. (2006). Crystallohydrodynamics of Protein Assemblies : Combining Sedimentation , Viscometry , and X-Ray Scattering. *Biophys J.*, 91(5), 1688-1697.
- MacCabe, K.P.; Holmgren, A.D.; Tornai, M.P. & Brady, D.J. (s.f.) (2013). Snapshot 2D Tomography Via Coded Aperture X-Ray Scatter Imaging. *Appl. Opt.* 52(19), 4582-4589.
- Maire, E. & Withers, P.J. (2014). Quantitative X-ray tomography. *Int. Mater. Rev.* 59(1), 1-43.
- Malcolm, A.A.; Liu, T.; Ng, I.K. & Teng, W.Y. (2013). *A Large Scale Multiple Source X-ray CT System for Aerospace Applications*. International Symposium on NDT in Aerospace. Singapore.
- Mayo, S.C.; Miller, P.R.; Wilkins, S.W.; Davis, T.J.; Gao, D.; Gureyev, T.E.; Paganin, D.; Parry, D.J.; Pogany, A.; Robb, T. & Stevenson, A.W. (2002). Phase-Contrast X-Ray Projection Microscopy for Materials Characterisation. *Mater. Forum*, 26, 15-19.
- Niemi, E.; Lassas M. & Siltanen, S. (2013). Dynamic X-ray tomography with multiple sources. 2013 8th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA) (pp.618-621). DOI: 10.1109/ISPA.2013.6703813.
- Ning, R.; Chen, B.; Yu, R.; Conover, D.; Tang, X. & Ning, Y. (2000). Flat Panel Detector-Based Cone-Beam Volume CT Angiography Imaging: System Evaluation. *IEEE Transactions on Medical Imaging* 19(9), 949-63.
- Pani, S., Cook, E. J., Horrocks, J. a, Jones, J. L., & Speller, R. D. (2010). Characterization of breast tissue using energy-dispersive X-ray diffraction computed tomography. *Applied Radiation and Isotopes : Including Data, Instrumentation and Methods for Use in Agriculture, Industry and Medicine*, 68(10), 1980-7.
- Prince, J.L. & Links, J. (2005). *Medical Imaging Signals and Systems*. 2a. ed. Prentice-Hall, Springer.
- Revol, V.; Kottler, C.; Kaufmann, R.; Straumann, U. & Urban, C. (2010). Noise Analysis of Grating-Based X Ray Differential Phase Contrast Imaging. *The Review of Scientific Instruments* 81(7), 073709-073709-7.
- Riepe, L. & Suhaimi, M. (2011). Application of High Resolution Micro-CT-Imaging and Pore Network Modeling (PNM) for the Petrophysical Characterization of Tight Gas Reservoirs-A Case History. En: *In SPE Middle East Unconventional Gas Conference and Exhibition* (pp. 1-13). Muscat, Oman. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/142472-MS>.
- Russo, P.; Lauria, A.; Mettivier, G. & Montesi, M.C. (2008). X ray cone-beam breast computed tomography: Phantom studies. En: *2008 IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.*, 4803-4810. DOI: 10.1109/NSSMIC.2008.4774317.
- Schlomka, J., Harding, A., Harding, G., Stevendaal, U. Van, & Grass, M. (2003). Coherent Scatter X-ray Computed Tomography In Medical Applications. *IEEE Nuclear Science*, 2, 900-901.
- Seeram, E. (2008). *Computed tomography: Physical Principles, Clinical Applications, and Quality Control*. 3a. ed. Elsevier Health Sciences.
- Sevak, M.M.; Thakkar, F.N.; Kher, R.K. & Modi, C.K. (2012). CT Image Compression Using Compressive Sensing and Wavelet Transform. In *International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, 138-142, DOI: 10.1109/CSNT.2012.39.

- Shannon, C.E. (1998). Communication in the Presence of Noise. *Proceedings of the IEEE* 86(2), 447-457.
- Shefer, E.; Altman, A.; Behling, R.; Goshen, R.; Gregorian, L.; Roterman, Y. & Zarchin, O. (2013). State of the Art of CT Detectors and Sources: A Literature Review. *Current Radiology Reports* 1(1), 76-91.
- Su, P.; Yang, J.; Lu, K.; Yu, N.; Wong, S.T.; Xue, Z. & Member, S. (2013). A Fast CT and CT-Fluoroscopy Registration Algorithm With Respiratory Motion Compensation for Image-Guided Lung Intervention. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 60(7), 2034-2041.
- Taina, I.A.; Heck, R.J.; Deen, W. & Ma, E.Y.T. (2013). Quantification of Freeze-Thaw Related Structure in Cultivated Topsoils Using X-Ray Computer Tomography. *Canadian Journal of Soil Science* 93(4), 533-553.
- UGCT (2015). *Centre for X-ray Tomography of the Ghent University (UGCT)*. Recuperado de: <http://www.ugct.ugent.be>
- Urondo, O.; Garc, L.; Deustotech-life, Z. & Avda, D. (2011). Computed Tomography CAD System for Monitoring and Modeling the Evolution of Lung Cancer Nodule. *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*, 484-489. DOI: 10.1109/ISSPIT.2011.6151610.
- Vine, D.J.; Paganin, D.M.; Pavlov, K.M.; Kräußlich, J.; Wehrhan, O.; Uschmann, I. & Förster, E. (2007). Analyzer-Based Phase Contrast Imaging and Phase Retrieval Using a Rotating Anode X-Ray Source. *Applied Physics Letters* 91(25), 254110-254113.
- Vontobel, P.; Lehmann, E. & Carlson, W.D. (2005). Comparison of X-Ray and Neutron Tomography Investigations of Geological Materials. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 52(1), 338-341.
- Wakin, M.B. (2008). An Introduction to Compressive Sampling. *IEEE Signal Processing Magazine* 25(2), 21-30.
- Wang G., Yu H. & De Man, B. (2008). An Outlook on X-Ray CT Research and Development. *Med. Phys.* 35(3), 1051-1063.
- Webb, S. (1987). A Review of Physical Aspects of X-Ray transmission Computed Tomography. *IEEE Proc. A Phys. Sci. Meas. Instrumentation, Manag. Educ. Rev.* 134(2), 126-135.
- Westmore M.S. & Fenster, A., C.I.A. (1995). Investigation of Coherent-Scatter Computed Tomography. *Physics of Medical Imaging*, 2432, 24-32.
- Westmore, M.S.; Fenster, A. & Cunningham, I.A. (1997). Tomographic Imaging of the Angular-Dependent Coherent-Scatter Cross Section. *Medical Physics*, 24, 3-10.
- Ying, Z.; Naidu, R. & Crawford, C.R. (2006). Dual Energy Computed Tomography for Explosive Detection. *Journal of X-Ray Science and Technology*, 14, 235-256.
- Yoneyama, A.; Yamada, S. & Takeda, T. (2011). Fine Biomedical Imaging Using X-Ray Phase-Sensitive Technique. *Advanced Biomedical Engineering*. En: G. Gargiulo (ed.). *InTech*. DOI: 10.5772/20456.
- Yu, H. & Wang, G. (2009). Compressed sensing based interior tomography. *Physics in Medicine and Biology* 54(9), 2791-2805.
- Yuasa, T.; Akiba, M.; Takeda, T.; Kazama, M.; Hoshino, A. & Watanabe, Y. (2002). Incoherent-Scatter Computed Tomography with Monochromatic Synchrotron X Ray : Feasibility of Multi-CT Imaging System for Simultaneous Measurement of Fluorescent and Incoherent Scatter X Rays. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 44(5), 1760-1769.
- Zhang, R.; Member, S.; Thibault, J.; Bouman, C.A.; Sauer, K.D.; Hsieh, J. & Member, S. (2013). Model-Based Iterative Reconstruction for Dual-Energy X-Ray CT Using a Joint Quadratic Likelihood Model. *IEEE Transactions on Medical Imaging* 33(1), 117-134.
- Zhu, Z.; Wahid, K.A. & Babyn, P. (2012). CT Image Reconstruction from Partial Angular Measurements Via Compressed Sensing. En: *IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering* (pp. 3-6). DOI: 10.1109/CCECE.2012.6334926.





INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Revista *TECNURA* Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnológica

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

1. 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 el Índice Bibliográfico Nacional Publindex (IBN) de Colciencias (Colombia) en la categoría A2, 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>

2. 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.

Artículos de reflexión: documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico y recurriendo a fuentes originales.

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.

3. FORMATO DEL ARTÍCULO

3.1 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.

3.2 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.

3.3 Del formato de presentación

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

Letra *Times New Román* 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.

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

Libro con autor

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

Libro con editor:

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

Libro versión electrónica:

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

Informe técnico:

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. (Informe Núm. xxx). Ciudad: Editorial

Informe con autores

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). U. S. *Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico*. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

Informe de una agencia del gobierno

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. *America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

Tesis

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. (Tesis inédita de maestría o doctorado). Nombre de la institución, Localización.

Tesis inédita, impresa

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

Tesis de base de datos comercial

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible

en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

Tesis web

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf

Estándares o patentes

Forma Básica

Apellidos, A. A. Título de la patente. País y número de la patente. Clasificación de la patente, fecha de concesión oficial. Número y fecha de solicitud de la patente, paginación.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

4. 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.

4.1 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.

4.2 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.

4.3 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.

5. 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.

6. 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.

6. 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
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur
Teléfono: 571 – 3238400 Extensión: 5003
Celular: 57–3153614852
Bogotá D.C., Colombia
Email: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com
Página web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>



INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

Tecnura journal District francisco José de caldas university Faculty of technology

CONTENT

- **Scope and editorial policy of the journal**
- **Type of accepted articles**
- **Article format**
- **Article submission**
- **Publication procedure**
- **Article arbitration**
- **Contact**

SCOPE AND EDITORIAL POLICY OF THE JOURNAL

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 Índice Bibliográfico Nacional Publindex (IBN) from Colciencias (Colombia) at the category A2, 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.xxxxxxx

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 ARBITRATION PROCESS

Considering the quarterly periodicity of the journal, the Editorial Committee makes four calls every year for the submission of articles, approximately in the months of February, May, August and November. The articles will be received until the date established in the call.

Once received the articles, the monitor of the journal will make an initial form evaluation to verify the completion of the elements mentioned in this guide of instructions to authors. After receiving again the article with the requested corrections by the journal's monitor, the paper will be submitted to evaluation by three academic peers (through time it is expected to include more external peers to participate in the process).

Each article sent to Tecnura journal is checked by two expert academic peers external to the institution of the authors, by a process of "Peer-review" of double blind, guaranteeing the anonymity of authors and evaluators; every paper sent is considered confidential and so it is demanded to evaluators.

Possible conclusions of the result of the evaluation by the judges are only three: publish the article without modifications, publish the article with modifications and not publish the article.

Subsequently, the Editorial Committee takes the decision to publish or not the articles, based on the results of the evaluations made by the assigned arbitrators. In case of contradictions in the evaluations with respect to the publication of an article, the editorial committee will send the article to a third peer and will be inclined for the two evaluations that have the same concept with respect to the publication of the article.

In each call the main author must suggest at least four possible external arbitrators to his work institution evaluators, who must be specialists in the specific topic of the article sent and must have at least Masters level, and at least two must to be international. Potential evaluators can belong to a university or industry, public or private; their

complete names must be provided, highest academic formation, institutional affiliation and e-mail. The editorial committee will analyze these four potential evaluators in order to enrich the database of arbitrators of *Tecnura* journal.

The Editorial Committee of *Tecnura* journal reserves the right to print, reproduce total or partially the article, as the right to accept or reject it. In the same way, it has the right to make any editorial modification that considers necessary; in this case the author will receive written recommendations from the evaluators. If accepted, authors must deliver the article with the suggested adjustments within the dates given by the journal to guarantee its publication in the programmed number.

CONTACT

For any additional information request, please send an e-mail to *Tecnura* journal tecnura@udistrital.edu.co, 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: 571-3238400 Extension: 5003
Mobile: 57-3153614852
Bogotá D.C., Colombia

Email:

tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com

Web page:

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

[Tecnura/index](#)



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

SUSCRIPCIÓN

Revista *Tecnura*

Nombre completo: _____
Institución u organización: _____
Factura a nombre de: _____
Dirección de envío: _____
Ciudad: _____ Departamento, Estado o provincia: _____
Código postal: _____ Apartado aéreo / P.O. Box: _____
País: _____ Correo electrónico: _____
Teléfono: _____ Fax: _____ Firma: _____

Tabla de costos de suscripción:

Región	1 Año	2 Años
Bogotá	40 000 COP	70 000 COP
Colombia	45 000 COP	80 000 COP
América Latina y el Caribe	40 USD	70 USD
Estados Unidos y Canadá	40 USD	70 USD
Otras regiones	60 USD	100 USD

Nota: los precios tanto en dólares como en pesos incluyen el valor del envío.

Diligenciar el formato de suscripción y enviarlo por correo junto con la copia del recibo de consignación a la dirección postal que aparece en el parte inferior de esta página o escaneado a los correos electrónicos tecnura@udistrital.edu.co y tecnura@gmail.com. La consignación nacional se realiza en el Banco de Occidente a nombre de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en la cuenta de ahorros número 230-81461-8.

Canje y suscripciones

Enviar a Ing. César Augusto García Ubaque, PhD.
Director y Editor Revista *Tecnura*

Biblioteca

Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70B No. 73A - 35 sur
Teléfono: +57 - 1 - 7311542
Celular: +57 - 3153614852
Bogotá, D.C., Colombia
Correo electrónico: tecnura@udistrital.edu.co tecnura@gmail.com
Tecnura en internet: <http://tecnura.udistrital.edu.co>



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

SIGN UP

Tecnura journal

Full name: _____
Institution or organization: _____
Invoice name: _____
Mailing address/address: _____
City: _____ Department, state or province: _____
Zip code: _____ P.O. Box: _____
Country: _____ E-mail: _____
Phone number: _____ Fax: _____ Signature: _____

Table of subscription costs:

Región	1 year	2 year
Bogotá	23 USD	40 USD
Colombia	26 USD	46USD
Latin America and The Caribbean	40 USD	70 USD
The United States of America and Canada	40 USD	70 USD
Other regions	60 USD	100 USD

Note: prices in both dollars and pesos include the value of the shipment.

Fill out the subscription form and mail it along with a copy of the receipt of consignment to the e-mail address that appears in the bottom of this page or scanned to the following E-mails: tecnura@udistrital.edu.co and tecnura@gmail.com. The national bank deposit is done in Banco de Occidente in the name of Universidad Distrital Francisco José de Caldas in the savings account number 230-81461-8.

Exchange and Subscription

Send Ing Cesar Augusto Garcia Ubaque PhD.
Editor and Publisher Tecnura Journal

Library

Technology Faculty
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 73A No. 70B-35 Sur
Phone: +57 - 1 - 7311542
Mobile: +57-3153614852
E-mail: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com