



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

REVISTA. Ingeniería

Volumen 26 • Número 1 • ISSN 0121-750X • E-ISSN 23448393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL

2021

REVISTA Ingeniería

Volumen 26 · Número 1 · Año 2020 · ISSN 0121-750X · E-ISSN 2344-8393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Carrera 7 No. 40-53
Edificio Administrativo
Piso 7 - Facultad de Ingeniería
Bogotá, Colombia
Teléfono: + 57 (1) 323 93 00 ext. 2413
Correo revista:
revista_ing@udistrital.edu.co

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving>

POSTURA EDITORIAL Y AUDIENCIA

La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico enfocada en la gran área de conocimiento de Ingeniería y Tecnología, de acuerdo a la clasificación de la OCDE, con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los temas del campo de la Ingeniería y la Tecnología. Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la Ingeniería y la Tecnología a través de la publicación de artículos originales e inéditos, con pertinencia local o internacional.

EDITOR

Nelson L. Díaz, PhD.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

COMITÉ EDITORIAL

Sarah Greenfield, PhD.
Faculty of Technology of
Montfort University,
Reino Unido

Alonso Salvador Sanchez, PhD.
Universidad de Alcalá,
España

Jose Marcio Luna, PhD.
Perelman School of Medicine,
University of Pennsylvania, Estados Unidos

José Luis Villa, PhD.
Universidad Tecnológica de
Bolívar, Colombia

César Leonardo Trujillo Rodríguez, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Josep M. Guerrero, PhD.
Aalborg University, Dinamarca

Carlos Andrés Peña, PhD.
Institute for Information and Commu-
nication Technologies - Haute Ecole
d'Ingénierie et de Gestion du Canton
de Vaud, Suiza

Iván Santelices Malfanti, PhD.
Universidad del Bío-Bío,
Chile

Carlos Eduardo Moreno, PhD.
Universidad Nacional de
Colombia

Víctor Hugo Grisales, PhD.
Universidad Nacional de
Colombia

Juan Carlos Figueroa, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

COMITÉ CIENTÍFICO

Germán Jairo Hernández, PhD.
Universidad Nacional
de Colombia

Paulo Gaona García, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Gustavo Puerto Leguizamón, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Elvis Eduardo Gaona García, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Germán Méndez Giraldo, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Francisco Santamaría Piedrahíta, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Diego Rodríguez Patarroyo, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

DIRECTIVAS

Ricardo García Duarte
Rector

Giovanny Tarazona Bermúdez, PhD.
Director Centro de Investigación
y Desarrollo Científico

Julio Barón Velandía, PhD.
Decano de la Facultad de Ingeniería

PREPARACIÓN EDITORIAL

Fabian Rios Gutierrez, MSc.
Gestor Editorial

Jenny Alexandra Jimenez, MSc.
Corrección de Estilo

José Daniel Gutierrez Mendoza
Corrección de Estilo

Julian Arcila-Forero, MSc.
Diseñador L^AT_EX

ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

Santiago Sánchez Solano, PhD.
Universidad de Sevilla

Cecilia Sandoval Ruiz, PhD.
Universidad de Carabobo

Andres J. Galisteo Junior, PhD.
Universidade de Sao Paulo - USP

Iván Andrés Sánchez Ortiz, MSc.
Universidad de Nariño, MSc.

Arturo Navarro Ocaña, PhD.
Universidad Nacional Autónoma de México

Lilia Muñoz, PhD.
Universidad Tecnológica de Panamá

José Varela Aldás, PhD.
Universidad Tecnológica Indoamérica

Freddy Fernando Muñoz Mopan, PhD.
University of Wollongong

D. E. Boldrini, PhD.
Planta Piloto de Ingeniería Química
(PLAPIQUI) - CONICET - UNS

Jesús Linares Flores, PhD.
Universidad Tecnológica de la Mixteca

Eduardo Abreo, PhD.
Instituto Nacional de Investigación
Agropecuaria Montevideo

Jan Amaru Töfflinger, PhD.
Pontificia Universidad Católica del Perú

Fredy Mesa Rodriguez, PhD.
Universidad del Rosario

Jairo Castillo, MSc.
Universidad Nacional de Loja

Alejandro N. Colli, PhD.
Universidad Nacional del Litoral

Miguel Melgarejo, MSc.
Universidad Distrital FJDC

Arnold D. Gomez, PhD.
Johns Hopkins School of Medicine

Suher Carolina Yabroud, PhD.
Centro de Investigación del Agua

Luis Alejandro Diaz Aldana, PhD.
Idaho National Laboratory

Guiomar Melgar Lalanne, PhD.
Universidad Veracruzana

Vladimir Villareal, PhD.
Universidad Tecnológica de Panamá

Eduard Galvis Restrepo, PhD.
EAN

M. Sepúlveda, PhD.
Hokkaido University

Andrés Blanco Ortega, PhD.
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Carlos Borrás Pinilla, PhD.
Universidad Industrial de Santander

Kennia Doncato, PhD.
Universidad Federal do Rio Grande -
Laboratorio de Biotecnología
de Halófitas

Pedro Pérez Higuera, PhD.
Centre for Advanced Studies
in Energy and Environment (CEAEMA)

Guillermo Gorky Reyes, PhD.
Universidad Nacional del Rosario

José Javier Valencia López, PhD.
Universidad Autónoma Metropolitana-
Cuajimalpa

PERMISO DE REPRODUCCIÓN

Open access



Atribución - No Comercial - Compartir igual.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

Los artículos incluidos en esta edición se encuentran bajo la licencia "Atribución - No Comercial - Compartir igual"; esta licencia permite a otros distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de tu obra de modo no comercial, siempre y cuando te den crédito y licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

Ni la Revista INGENIERÍA, Editor, Comité Editorial, Comité Científico, Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital F.J.C., otorgan ninguna garantía, expresa o implícita, asumen responsabilidad alguna por la exactitud, completitud o utilidad de cualquier información, aparato, producto o proceso divulgado, o que represente que su uso no infrinja derechos privados. La mención o referencia a algún producto, proceso o servicio comercial en específico, por su marca comercial, marca registrada, fabricante o cualquier otra denominación, no implica ni constituye su endoso, recomendación endosa, recomendación o favorecimiento por parte de la Revista INGENIERÍA. Los juicios y opiniones expresadas por los autores en este medio son de su responsabilidad y no establecen, reflejan o comprometen los de la Revista INGENIERÍA.

COSTO DE PROCESAMIENTO DE ARTÍCULOS

La Revista INGENIERÍA no realiza ningún cobro por las postulaciones, evaluación y publicación de los artículos sometidos. La Universidad Distrital Francisco José de Caldas asume los gastos relacionados con el proceso de edición, gestión y publicación. Los Pares Evaluadores realizan su contribución de manera voluntaria y sin retribución económica.

INDIZADA EN



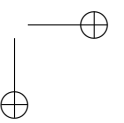
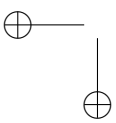
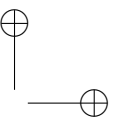
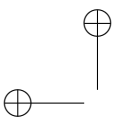


TABLE OF CONTENTS

Editorial

- Renovando mucho más que la confianza** 4
Renovando mucho más que la confianza
Nelson Leonardo Diaz

Ingeniería Ambiental

- Study of the Influence of Clays on the Transfer of Dissolved Oxygen in Water** 5
Estudio de la influencia de arcillas en la transferencia de oxígeno disuelto en aguas
Nicolas Rojas-Arias, Cesar Blanco Zuñiga, Ludy Peña Pardo, Martín Mendoza Oliveros, Segundo Martínez Ovalle

Ingeniería Mecánica

- Quantitative Analysis of Nanoporous Anodic Alumina Ordering Obtained with Different Anodizing Potentials** 15
Análisis cuantitativo del ordenamiento de alúmina anódica nanoporosa obtenida a diferentes potenciales de anodizado
Sara María Aguilar-Sierra, Félix Echeverría

Ingeniería Eléctrica y Electrónica

- Design of a Linear Quadratic Gaussian Controller and a Self-Tuning Regulator Based on Pole Placement to Control the Voltage of a DC Generator** 25
Diseño de un controlador lineal cuadrático gaussiano y un controlador autosintonizado por asignación de polos para el control del voltaje de un generador CD
Luis Edo García Jaimes, David Piedrahita Flórez

- Educational Environment for Primary School Using a Commercial Robotic System** 41
Entorno Pedagógico Para la Enseñanza en Básica Primaria Mediante el Uso de Sistema Robótico Comercial
Glen Ortega Díaz, Andrés Téllez Rodríguez, José Guarnizo Marín, Edgar Camacho Poveda

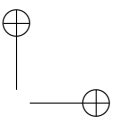
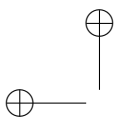
- Performance Analysis of CNN Layers for Heterogeneous FPGAs-based Architectures Using HLS** 62
Análisis de desempeño de capas de CNN para arquitecturas heterogéneas basadas en FPGAs usando HLS
Mateo Guerra Londono, Cristian Alzate Anzola, Luis Castano Londono, David Marquez Viloría, Ricardo Velasquez Velez

Ingeniería Química y de Petróleos

- Evaluation of Extracts Obtained from Fruit Wastes Using Different Methods** 77
Evaluación de extractos de residuos de frutas utilizando diferentes métodos
Ciliana Florez Montes, Andrés Felipe Rojas González, Sneyder Rodríguez Barona

- Pattern Recognition Algorithm for Automatic Quantification of Toxoplasma gondii Tachyzoites** 93
Algoritmo de reconocimiento de patrones para cuantificación automática de taquizoitos de Toxoplasma gondii
Karen Murcia Zapata, María Romero Cerón, Graciela Juez Castillo, Brayan Valencia Vidal

- Instructions for Authors** 111



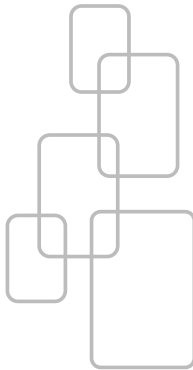
Editorial

Renovando mucho más que la confianza

REVISTA Ingeniería

Los más recientes resultados de la convocatoria 875 para la indexación de revistas científicas colombianas especializadas Publindex 2020 de Minciencia ratificaron la indexación de la revista *Ingeniería* en la categoría B1. Esta no solo es una refrendación del trabajo realizado sino una ratificación de la confianza que nuestros lectores y autores depositan en el proceso desarrollado. Esta confianza no se ha perdido y se mantuvo incluso en momentos difíciles como aquellos que consideramos injustos, cuando perdimos la indexación en Publindex. Agradecemos la gestión del equipo editorial y el apoyo de diferentes personas a lo largo de los casi 27 años de trayectoria de esta publicación, los cuales han contribuido al posicionamiento y reconocimiento de la comunidad científica en diferentes áreas de la ingeniería.

Ahora el trabajo y la responsabilidad serán incluso mayores. Necesitamos incrementar la visibilidad de nuestras publicaciones manteniendo un contacto continuo con nuestra comunidad de autores, revisores y lectores. Además, apuntar a una expansión de la comunidad objetivo de nuestras publicaciones. Una muestra de ello es el presente número (vol. 26, no. 1 de 2021), el cual contiene destacadas contribuciones en diferentes áreas de la ingeniería, entre ellas Ingeniería Ambiental, Ingeniería Química y de Petróleos, Ingeniería Eléctrica y Electrónica e Ingeniería Mecánica.



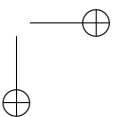
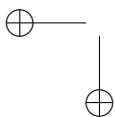
Nelson Leonardo Díaz A., PhD. 
nldiaza@udistrital.edu.co

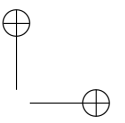
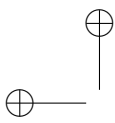
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Open access



Citación: N. Díaz, "Renovando mucho más que la confianza", *Ingeniería*, vol. 26, no. 1, pp. 4, (2021).
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.17819>





Research

REVISTA
Ingeniería

Study of the Influence of Clays on the Transfer of Dissolved Oxygen in Water

Estudio de la influencia de arcillas en la transferencia de oxígeno disuelto en agua

C.R. Blanco-Zuñiga* ¹, **N. Rojas-Arias**** ^{1,2}, **L.Y. Peña-Pardo** ¹,
M.E. Mendoza-Oliveros ¹, **S.A. Martínez-Ovalle** ¹

¹Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja-Boyacá, Colombia., ²Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Materiais -DeMa, São Carlos-São Paulo, Brasil.

Correspondence email: cesar.blanco@uptc.edu.co*, nicolas.rojas@estudante.ufscar.br**

Recibido: 25/01/2020. Modificado: 30/09/2020. Aceptado: 06/10/2020.

Abstract

Context: The lack of dissolved oxygen (DO) in water bodies has become a serious problem for several ecosystems due to drastic changes in their climatic, biological, and physical conditions. The presence of microorganisms, organic matter, and clays, which are carried by landslides and rainwater, affect the process of restoration and transfer of DO in water, thus making it necessary to study how these factors affect the process of DO transfer in water bodies.

Method: This work is focused on studying the influence of clays during the DO transfer process in water bodies. To this effect, samples of clays from the region of Paipa, Boyacá, were added in 1, 3 and 5 % by weight into the samples of clean water. The aeration process was performed using a constant flow diffusion system. The tests were carried out until the saturation of dissolved oxygen in each of the water samples was obtained.

Results: The results show that the presence of clays during the transfer of DO have little influence on bodies of water. However, variations were observed in time intervals of <5 min in which the increase in the percentage of clays favored the transfer of DO.

Conclusions: With these results, it is concluded that the presence of clays can generate a beneficial effect during the transfer of DO in bodies of water with a high oxygen deficiency, whereas, for water samples with a relatively high percentage of DO, clays can hinder the DO restoration process.

Keywords: Dissolved oxygen (DO), diffuse aeration systems, clays, anoxic water.

Language: English

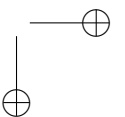
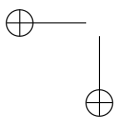
Open access



Cite this paper as: C. Blanco-Zuñiga, N. Rojas-Arias, L.Y. Peña-Pardo, M. Mendoza-Oliveros, S. Martínez-Ovalle. "Study of the Influence of Clays on the Transfer of Dissolved Oxygen in Water", Ingeniería, Vol. 26, Num. 1, pp. 5-14 (2021).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

<https://doi.org/10.14483/23448393.15846>



Resumen

Contexto: La carencia de oxígeno disuelto (OD) en cuerpos de agua se ha convertido en un problema ambiental para varios ecosistemas debido a cambios drásticos en sus condiciones climáticas, biológicas y físicas. La presencia de microorganismos, materia orgánica y arcillas, transportados por deslizamientos y aguas lluvias, afectan los procesos de restauración y transferencia de OD en el agua, lo que hace necesario estudiar cómo dichos factores afectan el proceso de transferencia de OD.

Método: Este trabajo se centra en estudiar la influencia de las arcillas durante el proceso de transferencia de OD en cuerpos de agua. Para esto, se utilizaron muestras de arcillas de la región de Paipa-Boyacá, adicionadas en 1, 3 y 5 % en peso a muestras de agua limpia. El proceso de aireación se llevó a cabo utilizando un sistema de difusión de flujo constante. Los ensayos se realizaron hasta obtener la saturación de oxígeno disuelto en cada una de las muestras de agua trabajadas.

Resultados: Los resultados muestran que la presencia de arcillas durante la transferencia de OD tienen poca influencia en los cuerpos de agua. Sin embargo, se observaron variaciones en intervalos de tiempo <5 min en los que el incremento del porcentaje de arcillas favorecía la transferencia de OD.

Conclusiones: Con estos resultados se concluye que la presencia de arcillas puede generar un efecto benéfico durante la transferencia de OD en cuerpos de agua con una alta carencia de oxígeno, mientras que, para muestras de agua con un porcentaje relativamente alto de OD, las arcillas perjudican el proceso de restauración de OD.

Palabras clave: Oxígeno disuelto (OD), sistemas de aireación difusa, arcillas, agua anóxica.

Idioma: Inglés

1. Introduction

The lack of dissolved oxygen (DO) in bodies of water (WBs) has badly affected various ecosystems [1]. This lack depends on the following aspects: the quality of water and physical, biological, and climatic factors, which may hinder the content of DO in water, thus affecting the life present in WBs [2]–[4]. To overcome this problem, several methods have been introduced for the aeration and restoration of DO in WBs, enabling the mineralization and elimination of most contaminants from water [5]–[7]. A prominent example of this is the management of aeration processes by mechanical and diffusion methods, which have allowed the transfer and regulation of DO in anoxic water.

Mechanical aeration systems have a low energy consumption compared to conventional diffusion systems [2]. However, the application of diffusion systems in aeration processes is widely accepted due to their efficiency in large BW [8]. On the other hand, the aeration processes and the treatment of BW are related to other factors such as microorganisms, organic matter, and sludge due to landslides, which transport the clays through the rainwater and that can affect the transfer processes of DO in WBs [9]. The DO in water bodies can vary due to different reasons, which may be natural or anthropogenic. The latter is related to polluting processes and the alteration of ecosystems with raw wastewater discharges. Wastewater, when discharged into water bodies, can decrease the concentration of dissolved oxygen (DO) [10], [11]. Under natural conditions, the effect of rain can cause landslides, which transport sediments and clays that can affect DO transfer processes [9]. This, in turn, is influenced by other factors such as: temperature [12], high levels of organic matter [13], depth, river turbidity, and runoff caused by rainfall [14]–[16]. These agents affect the transfer of oxygen in the water, thus increasing energy consumption during water treatment processes. This is

why the elimination of some of these agents prior to performing an aeration process is preferred [8].

In several cases, the presence of clays in WBs favors the retention and elimination of elements. This is the case of adsorption heavy metals, present in WBs, due to their positive charge, thus allowing a lower energy consumption in downstream purification processes [17]. Moreover, the presence of clays can also contribute to the removal of microorganisms while increasing the oxygen content in WBs [18]. However, the aforementioned studies have not shown the influence that clays can have during DO transfer processes in clean BWs with an oxygen deficit. The objective of this work is to study the influence of clays present in the Paipa-Boyacá region in Colombia on the transfer of DO in samples of oxygen-deficient waters (anoxic waters) produced on a laboratory scale.

2. Materials and experimental details

Measurements were made on 12 L samples of clean water with 5 repetitions per sample, for a total of 20 trials. In prior tests, the samples were treated by distillation to ensure the elimination of biological and particulate material. The initial dissolved oxygen was measured by using a Hach-flexi HQ30d US Pat (6912050) oximeter at a height of 2800 m.a.s.l and a pressure of 740 hPa. The oximeters were placed inside the assembly, as shown in Fig. 1. The DO data obtained in water samples as an initial parameter was $7,32 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. This parameter allowed establishing the total dissolved oxygen in the water samples using Eq. (1). All tests were carried out at a constant temperature of $17 \text{ }^\circ\text{C}$, giving greater importance of the study to the influence of the presence of clays on the transfer of DO in water.

The elimination of DO in the water was done by adding sodium sulfite (Na_2SO_3), as presented in Eq. (2), and a catalyst cobalt chloride was used [6]:

$$W_{O_2} = O_{2i} \cdot V[g] \quad W_{O_2} = O_{2i} \cdot V[g] \quad (1)$$

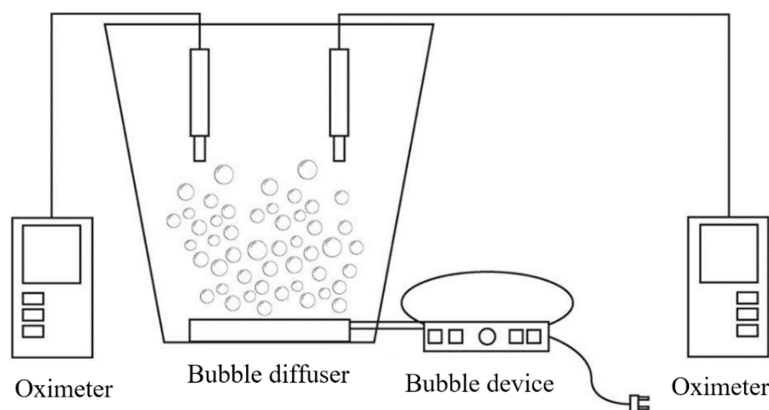
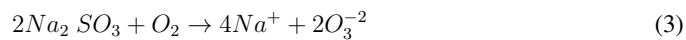


Figure 1. Experimental set-up for performance evaluation of the diffusion system used in this study

$$Na_2SO_3 = WNa_2SO_3 \cdot O_2 / 0,5 \cdot WO_2 [g] \quad (2)$$

where Na_2SO_3 is the molecular weight of sodium sulfite required in [g] to remove all the dissolved oxygen present in water samples, O_2 is the molecular weight of oxygen [g], WNa_2SO_3 is the molecular weight of sulfite in one mole of Na_2SO_3 , WO_2 is the total dissolved oxygen content in each of the water samples in g, O_{2i} is the DO content [$g \cdot L^{-1}$], and V is the water volume [L]. This study used an additional 0,5 % sodium sulfite during the process to ensure the total elimination of the DO present in each of the water samples.

The use of the sulfite technique for the elimination of DO in this study allows a stable control system for each of the treated samples. The application of sulfite favors the elimination of the DO present in water by through the formation of sulfate ions, which is described by Eq (3). To accelerate the kinetics of the reaction, $CoCl_2$ was used, thus ensuring that this reagent does not influence DO transfer [6].



The anoxic water samples were prepared with bentonite clays obtained from the study area. The study was carried out by adding 0, 1, 3 and 5 % of the additional weight of bentonite in the anoxic water samples, making 3 replicates for each type of sample. The samples were stirred for 20 minutes to ensure the homogeneity of the clays in the solution, as well as the removal of clusters from the clay during deposition into the water samples. 5 replicates were made for each type of sample, for a total of 20 samples in this study.

The clay samples were obtained in the municipality of Paipa, Boyacá, Colombia. The material was sieved at 74 microns (200 meshes) and dried in an electric oven at 105 °C for 6 hours. To characterize the clay samples, they were homogenized and analyzed using the X-ray diffraction (XRD) technique with a Phillips PW1700 X-ray diffractometer, equipped with a 26° graphite monochromator, a Co source at wavelength $\lambda = 1,75 \text{ \AA}$, a PW1825 generator, and a Pixel variable angle detector with the Bragg-Brentano configuration [19]. The diffraction pattern is showed in Fig. 2, as well as the result of the clay composition analysis obtained through XRD. The characterization of the sample was performed using the HighScore-Plus software, supplied by PANalytical X'pert Pro. The samples have a main composition of montmorillonite and illite (~79 % of the total composition), which may be closely related and can contain other compounds in a lesser proportion, such as quartz and other silicate-type minerals [20], [21]. This study found that the clay samples used are composed of quartz, albite, and faujasite occurs from the zone [22]. The XRD pattern shows a characteristic diffraction peak for quartz at an angle of 31°. The diffraction peaks generated for montmorillonite and illite are consistent with those reported by [23] using a source of $CuK\alpha 1$ L3 ($\lambda = 1,540598 \text{ \AA}$). The transfer of the diffraction peaks is due to the type of source used.

The DO transfer process was carried out through a diffuse vertical bed aeration system, using a 16 W air pump with a $2,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ air transfer and a bubble membrane. The management of this type of aeration systems allows a better control of the variables that occur during the WB restoration and DO transfer processes. Restricting operations to a system with vertical aeration, such as the one presented in Fig. 1, gives greater control over the DO transfer process, which allows to eliminate

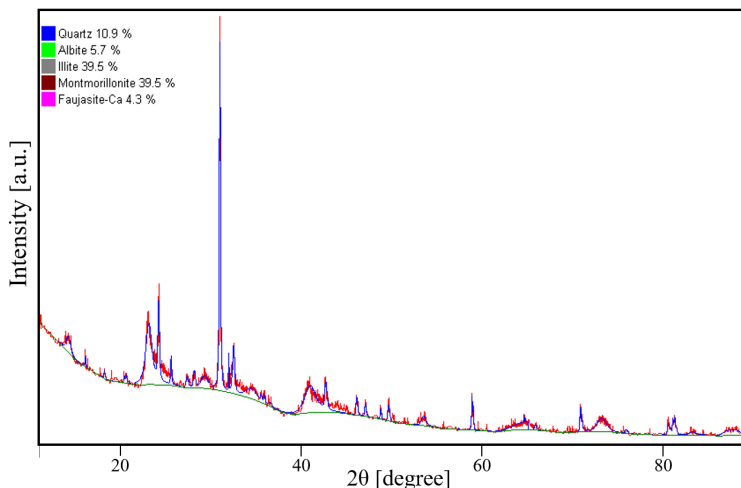


Figure 2. XRD patterns of clays from the area of Paipa, Boyacá, Colombia, and used in this study

variations in the data due to the horizontal currents or flows within each system [24]. The tests were performed until a constant DO content was obtained. The data obtained in the DO transfer process for each of the measurements allowed determining the energy consumption and the efficiency of the aeration process using the calculations reported by [8].

3. Results

The results obtained in this research are presented in the form of graphs for an optimal relation of the data obtained from each one of the analyzed samples. These graphs allowed us to observe the characteristics and behavior of the samples during the DO transfer process in each of the tests performed. The data obtained in this study were averaged, presenting a hatch of standard variation of $\sim 0,5\%$ on the contribution of DO in the water samples for all the studied cases.

The behavior of the DO transferred in each of the water samples worked as a function of time, as shown in Fig. 3. This process can be presented in the form of the percentage of DO shrinkage (%) until it reaches the saturation point (Fig. 3a), or in the form the percentage of DO transfer (%) supplied in each of the time intervals (Fig. 3b).

4. Analysis

The behavior of the DO in the 4 studied types of water samples during the aeration process is shown in Fig. 3. Fig. 3a shows the DO concentration as a function of time up to a stable DO value. The contribution of DO transfer within time intervals is shown in Fig. 3b. Other factors that have an influence during DO transfer in water, such as temperature, were not considered.

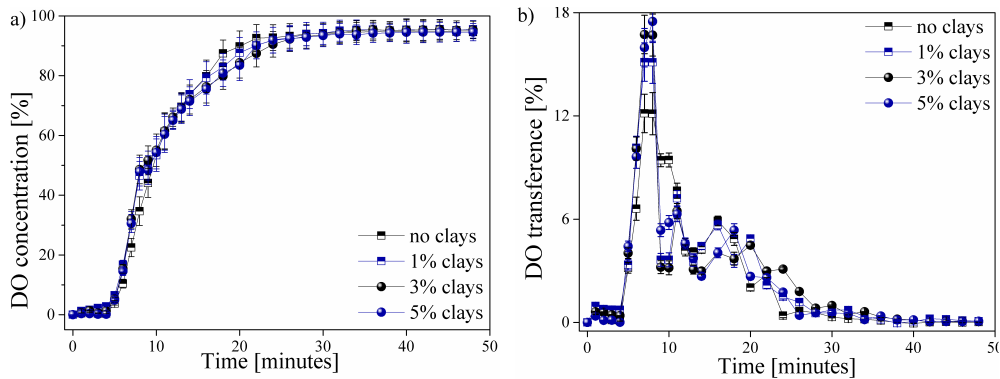


Figure 3. Behavior of the DO transferred in each of the water samples as a function of time (a) DO contraction percentage (%) and b) percentage of DO transferred per time unit)

A stagnation zone of DO content occurs during the first 5 minutes of the aeration process. This behavior is reported by all the analyzed samples. The generated transfer stagnation is due to the application of an excess of sodium sulfite, which has been mentioned previously, thus guaranteeing the total removal of the oxygen present in the initial sample [25]. No variation is observed in the samples within this range, which rules out the influence of clays.

Similarly, a behavior in the DO transfer is presented in Fig. 3a for the 4 samples. Slight variations in samples were observed between the 5-10 and the 18-24-minute intervals. These areas are best visualized in Fig. 3b, where abnormal behavior can be observed. A greater contribution to the DO transfer rate was observed due to the increase in the content of clays in the water samples, thus obtaining a maximum peak of 17,5 % of the total DO transferred for the sample with an addition of 5 % of the clays present in the region of Paipa, Boyacá. This transfer peak decreased as the content of clays in the water was reduced, obtaining values of 17, 15,2, and 12,1 % of DO, respectively, for the samples with 3, 1, and 0 % (free of clays). The possible affinity between oxygen and particles can improve the transfer rate of DO in water [26].

The behavior of the process of transfer and saturation of DO in water samples in this study could be compared with the studies realized by [5]. This behavior is of the Arrhenius type, in which the oxygen content in the sample will gradually approach without reaching the maximum theoretical value. This behavior is also seen in the DO content with respect to the variation of the temperature, evincing an inverse behavior to that of the DO transfer. [27] reported the reduction of the DO transfer rate from the 10th minute of measurement and a saturation point from the 28th, obtaining a maximum saturation value of $95 \pm 1,2$ % for each of the 4 studied samples. The decrease in the contribution rate of DO in the water samples from values close to the saturation point has also been reported by [28] and [29], who reported that the presence of high DO values, i.e., with a distance less than the maximum point of saturation or stagnation, which requires a greater amount of input time and of oxygenation in the water to reach this saturation point.

The data presented in Fig. 3b shows that the addition of and increase in the percentage of clays in the water samples does not exert a significant influence on the maximum saturation point and

the DO transfer time. However, a slight decrease in DO concentration was observed between 16-20 minutes of measurement due to the addition and increase of clays in the water samples. This behavior was observed after reaching a DO concentration. The measurements were made in controlled environments. Therefore, they are not fully reproducible on a real scale in natural water bodies. There is a hatch of variables, such as temperature, dissolved metals, microorganisms, and so on, which also affect the DO transfer process in the water. However, the obtained results are presented as an initial stage prior to the study of the effect of these clays in environments outside laboratory conditions, as well as the study of other factors that affect water quality and DO content in water. These variables are expected to be analyzed in future research. n of $80 \pm 5 \%$ (Fig. 3a). Increasing the suspended clay particles can reduce the total transfer area, thus generating a decrease in the contribution of DO at this stage of the process, *i.e.*, generating a surface contamination that allows the contribution of DO to the WB [30].

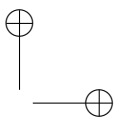
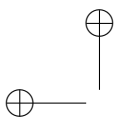
The value of the coefficient at room temperature of the oxygen transfer ($K \text{ La} \cdot \text{h}^{-1}$) shows an average value of $12,45 \pm 3,28$ a.u. With this value, it is possible to obtain an average value of N of $0,86 \pm 0,12 \text{ kg O}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ for each of the samples in this study. This value remains within the range of efficiency in the aeration processes by diffusion mechanisms (from 0,3 to $1,2 \text{ kg O}_2 \cdot \text{kW}^{-1}$) [8], showing that the system behaves in conditions similar to those found at the industrial level. The values of the standard oxygen transfer rate (SOTR) and standard oxygen transfer efficiency (SOTE) are $12,31 \text{ kg O}_2 \cdot \text{h}^{-1}$ with an efficiency of 38,48 %. Therefore, the energy consumption of each of the samples remained within the range established by the literature [8], [31], [32]. These values can vary with pressure generated by the flow of the gas that transports oxygen, as well as the height of the water column (depth) [33]. This opens a study hatch to analyze the effect of these parameters in future work.

From a general point of view, the study shows the following:

1. the presence of clays in anoxic water bodies favors the required DO transfer;
2. the presence of clays in water bodies with a lower DO content, but close to its saturation point in the water, shows a harmful behavior in reducing the DO transfer capacity in water; and
3. the variation and increase of clays in cases 1) and 2) affects the processes of DO transfer.

This is favorable for water bodies lacking DO (anoxic), while a low or null content of clays in bodies of water with a relatively high DO content but it produces a lower than the saturation point of the DO in water. Our results are consistent with previously reported work [34], which presented the low influence of clays during the transfer of DO in bodies of water. The presence of clays exerts a degree of influence on the DO transfer process in a superficial way.

These measurements were made on a laboratory scale, so they should be taken as an initial phase that must be tested with other variables that affect DO concentration, considering the characteristics of the natural water bodies to be studied. Factors such as temperature were not considered in this study; we focused only on the effect of the clay studied during the transfer of DO in anoxic water samples under controlled conditions.



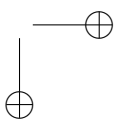
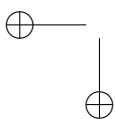
5. Conclusions

In this study, we have shown the possible influence of the clays on WBs during DO transfer processes in a controlled environment. The data obtained in this study allowed us to establish that the presence of clays in WBs with a lack of DO (anoxic waters) does not have a direct influence on the DO saturation point during the oxygen transfer process through the use of diffuse aeration, i.e., the presence and increase of the concentration of clays present in Paipa, Boyacá, Colombia. However, the data allowed us to establish that the presence of clays in the water can favor the transfer of oxygen in the first periods of time. Therefore, this is an energy advantage for WBs with a high lack of DO and a relatively high percentage of clays. The behavior decreases as the DO content in the system increases, with a low clay content within this type of WB, which promises to be a better option.

The measurements were made in controlled environments. Therefore, they are not fully reproducible on a real scale in natural water bodies. There is a hatch of variables, such as temperature, dissolved metals, microorganisms, and so on, which also affect the DO transfer process in the water. However, the obtained results are presented as an initial stage prior to the study of the effect of these clays in environments outside laboratory conditions, as well as the study of other factors that affect water quality and DO content in water. These variables are expected to be analyzed in future research.

Referencias

- [1] A. S. Ren, F. Chai, H. Xue, D. M. Anderson, and F. P. Chavez, "A Sixteen-year Decline in Dissolved Oxygen in the Central California Current," *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–9, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25341-8> ↑6
- [2] J. Mueller, W. C. Boyle, and H. J. Popel, *Aeration: principles and practice*, 1st ed., vol. 11. Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 2002. <https://doi.org/10.1201/9781420010343> ↑6
- [3] L. D. Dien, L. H. Hiep, S. J. Faggotter, C. Chen, J. Sammut, and M. A. Burford, "Factors driving low oxygen conditions in integrated rice-shrimp ponds," *Aquaculture*, vol. 512, p. 734315, Oct., 2019. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734315> ↑6
- [4] G. Kumar, C. Engle, T. Hanson, C. Tucker, T. Brown, L. Bott, L. Roy, C. Boyd, M. Recsetar, P. Jeonghwan, and E. Torrans, "Economics of alternative catfish production technologies," *J. World Aquac. Soc.*, vol. 49, no. 6, pp. 1039–1057, Dec., 2018. <https://doi.org/10.1111/jwas.12555> ↑6
- [5] E. Durán Herrera and G. Rojas Meza, "Modelación de la transferencia de oxígeno en sistemas de aireación mediante un modelo de dos zonas simplificado," *Cienc. y Tecnol.*, vol. 24, no. 2, pp. 109–127, 2006. ISSN: 0378-0524 ↑6, 10
- [6] L. Uby, "Next steps in clean water oxygen transfer testing – A critical review of current standards," *Water Res.*, vol. 157, pp. 415–434, Jun. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.063> ↑6, 7, 8
- [7] T. W. Brown, C. S. Tucker, and B. L. Rutland, "Performance evaluation of four different methods for circulating water in commercial-scale, split-pond aquaculture systems," *Aquac. Eng.*, vol. 70, pp. 33–41, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.12.002> ↑6
- [8] J. A. Rojas, *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*, 3rd ed. Bogotá, Colombia, Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010. ↑6, 7, 9, 11
- [9] V. P. Singh, *Entropy theory in hydrologic science and engineering*, New York, NY, McGraw Hill Professional, 2015. ↑6
- [10] D. Carrillo S. Carvajal, J. Coto, V. Salgado, J. Herrera, D. Rojas, and C. Benavidez, "Variación del oxígeno disuelto en el Río Burío- Quebrada Seca, Heredia, Costa Rica, en el periodo 2005 - 2010", Laboratorio de Manejo del Recurso Hídrico, Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia, Costa Rica, 2012. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11056/7468> ↑6



- [11] L. S. Quiroz, E. Izquierdo, and C. Menéndez, "Study of the environmental impact of wastewater discharges on the self-purification capacity in portoviejo river, Ecuador," *Rev. Cent. Azúcar*, vol. 45, no. 1, pp. 73–83, 2018. http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/55 ↑6
- [12] H. Muñoz, S. Orozco, A. Vera, J. Suárez, E. García, M. Neria, and J. Jiménez, "Relación entre oxígeno disuelto, precipitación pluvial y temperatura: río Zahuapan, Tlaxcala, México," *Tecnol. y Cienc. del Agua*, vol. 6, no. 5, pp. 59-74, 2015. <http://www.revistatya.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1170/1073> ↑6
- [13] P. Córdova, D. Calderón, and G. Argota, "Medición del coeficiente de transferencia del oxígeno en aguas residuales," *Campus*, vol. 23, no. 26, pp. 123–128, Dec. 2018. <https://doi.org/10.24265/campus.2018.v23n26.02> ↑6
- [14] Y. Ouyang, G. Feng, P. Parajuli, T. Leininger, Y. Wan, and J. N. Jenkins, "Assessment of Surface Water Quality in the Big Sunflower River Watershed of Mississippi Delta Using Nonparametric Analysis," *Water, Air, Soil Pollut.*, vol. 229, no. 11, p. 373, Nov. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-4022-8> ↑6
- [15] Y. Ouyang, P. B. Parajuli, G. Feng, T. D. Leininger, Y. Wan, and P. Dash, "Application of Climate Assessment Tool (CAT) to estimate climate variability impacts on nutrient loading from local watersheds," *J. Hydrol.*, vol. 563, pp. 363–371, Aug. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.017> ↑6
- [16] S. Shrestha, J. Farrelly, M. Eggleton, and Y. Chen, "Effects of conservation wetlands on stream habitat, water quality and fish communities in agricultural watersheds of the lower Mississippi River Basin," *Ecol. Eng.*, vol. 107, pp. 99–109, Oct. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.054> ↑6
- [17] N. Chen, G. Fang, G. Liu, D. Zhou, J. Gao, and C. Gu, "The degradation of diethyl phthalate by reduced smectite clays and dissolved oxygen," *Chem. Eng. J.*, vol. 355, pp. 247–254, Jan. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.160> ↑7
- [18] R. Cardoso, I. Pires, S. O. D. Duarte, and G. A. Monteiro, "Effects of clay's chemical interactions on biocementation," *Appl. Clay Sci.*, vol. 156, pp. 96–103, May 2018. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.01.035> ↑7
- [19] INCITEMA, "Análisis de Falla y Evaluación de Materiales," *INCITEMA*, 2018. [Online]. Available: <https://incitema.com/index.php/analisis-de-falla-y-evaluacion-de-materiales/> ↑8
- [20] N. Guo, C. Thomas, J. Tang, and Q. Tong, "Mapping white mica alteration associated with the Jiama porphyry-skarn Cu deposit, central Tibet using field SWIR spectrometry," *Ore Geol. Rev.*, vol. 108, pp. 147–157, May 2019. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.07.027> ↑8
- [21] G. Na, G. WenBo, L. Dong, H. YiRu, Z. Long, and G. YaNan, "Alteration zoning model associated with Tibetan Sinongduo epithermal deposit, the continental volcanic areas of Gangdise metallogenic belt," *Acta Petrol. Sin.*, vol. 35, no. 3, pp. 833–848, 2019. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2019.03.13> ↑8
- [22] Instituto Colombiano de Geología y Minería, *Evaluación geoquímica para geología médica en las zonas asociadas a las fuentes termales del departamento de Boyacá: Sectores Paipa -Iza y Soatá - Guicán. Versión 1.0*, Bogotá, Colombia, Ingeominas, 2010. ↑8
- [23] A. Marsh, A. Heath, P. Patureau, M. Evernden, and P. Walker, "Alkali activation behaviour of un-calcined montmorillonite and illite clay minerals," *Appl. Clay Sci.*, vol. 166, pp. 250–261, Dec. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.09.011> ↑8
- [24] S. Gillot, "Effect of air flow rate on oxygen transfer in an oxidation ditch equipped with fine bubble diffusers and slow speed mixers," *Water Res.*, vol. 34, no. 5, pp. 1756–1762, Apr. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00323-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00323-1) ↑9
- [25] P. R. Cogate, A. A. Beenackers, and A. B. Pandit, "Multiple-impeller systems with a special emphasis on bioreactors: a critical review," *Biochem. Eng. J.*, vol. 6, pp. 109–144, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(00\)00081-4](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(00)00081-4) ↑10
- [26] J. V. Littlejohns and A. J. Daugulis, "Oxygen transfer in a gas–liquid system containing solids of varying oxygen affinity," *Chem. Eng. J.*, vol. 129, no. 1–3, pp. 67–74, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.11.002> ↑10
- [27] A. Bahadori and H. B. Vuthaluru, "Simple Arrhenius-type function accurately predicts dissolved oxygen saturation concentrations in aquatic systems," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 88, no. 5, pp. 335–340, Sep. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2010.05.002> ↑10
- [28] Y. Du, F. Chen, L. Zhou, T. Qiu, and J. Sun, "Effects of different layouts of fine-pore aeration tubes on sewage collection and aeration in rectangular water tanks," *Aquac. Eng.*, vol. 89, p. 102060, May 2020. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102060> ↑10

- [29] A. Tekile, I. Kim, and J.-Y. Lee, "Extent and persistence of dissolved oxygen enhancement using nanobubbles," *Environ. Eng. Res.*, vol. 21, no. 4, pp. 427–435, Sep. 2016. <https://doi.org/10.4491/eer.2016.028> ↑
10
- [30] J. Huang and T. Saito, "Influences of gas–liquid interface contamination on bubble motions, bubble wakes, and instantaneous mass transfer," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 157, pp. 182–199, Jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.05.013> ↑
11
- [31] M. K. Stenstrom, S.-Y. (Ben) Leu, and P. Jiang, "Theory to Practice: Oxygen Transfer and the New ASCE Standard," *Water Environ. Found.*, pp. 4838–4852, 2006. <https://doi.org/10.2175/193864706783762931> ↑
11
- [32] S. Bun, N. Chawaloephonsiya, F. Nakajima, T. Tobino, and P. Painmanakul, "Comparative study of local gas-liquid hydrodynamics and mass transfer between conventional and modified airlift reactors," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 7, no. 4, p. 103206, Aug. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103206> ↑
11
- [33] J. Lee, "Baseline Mass-Transfer Coefficient and Interpretation of Nonsteady State Submerged Bubble-Oxygen Transfer Data," *J. Environ. Eng.*, vol. 146, no. 1, p. 04019102, Jan. 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001624](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001624) ↑
11
- [34] D. O. Pino-Herrera, Y. Fayolle, Sylvain Pageot, D. Huguenot, G. Esposito, E.D. Hullebusch, and Y. Pechaud, "Gas-liquid oxygen transfer in aerated and agitated slurry systems with high solid volume fractions," *Chem. Eng. J.*, vol. 350, pp. 1073–1083, Oct. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.193> ↑
11

Cesar René Blanco Zuñiga

Civil. Engineer and M. Sc. in Environmental Engineering. Professor of the Environmental Engineering Department at Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. He is currently working in the area of Water Quality and Environmental Processes.

e-mail: cesar.blanco@uptc.edu.co

Ludy Yiseth Peña Pardo

Environmental Engineering Student at Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. She is currently working in the area of water and soil quality at UPTC.

e-mail: ludy.pena@uptc.edu.co

Nicolás Rojas Arias

Metallurgical Engineer from the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. He has focused on the areas of materials and minerals processing, management of radioactive materials and waste, and the design of materials for engineering. He is currently PhD student in Materials Science at the Materials Department of the Federal University of São Carlos, Brazil, working in the area of Additive Manufacturing.

e-mail: nicolas.rojas@estudiante.ufscar.br

Martín Emilio Mendoza Oliveros

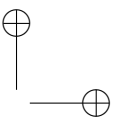
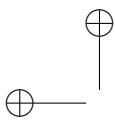
Metallurgical Engineer from Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. PhD in Materials and Chemical and Metallurgical Processes Engineering from the Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Brazil. He is currently a professor of the Metallurgy program at UPTC. He has focused on advanced materials characterization, composites, nanomaterials synthesis, and application of materials for environmental problems.

e-mail: martin.mendoza@uptc.edu.co

Segundo Agustín Martínez Ovalle

Ph.D. in Medical Science. Ms.C. in Sciences. He is currently a professor of the Physics program at Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia and works in the areas of Nuclear and Medical Physics.

e-mail: s.agustin.martinez@uptc.edu.co





Research

REVISTA
Ingeniería

Quantitative Analysis of Nanoporous Anodic Alumina Ordering Obtained with Different Anodizing Potentials

Análisis cuantitativo del ordenamiento de alúmina anódica nanoporosa obtenida a diferentes potenciales de anodizado

Sara María Aguilar-Sierra* ¹, Félix Echeverría-Echeverría ²

¹Universidad Católica Luis Amigó, Grupo de Investigación Sistemas de Información y Sociedad del Conocimiento SISCO, (Medellín, Colombia), ²Universidad de Antioquia, Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales CIDEMAT (Medellín, Colombia).
Correspondence email: sara.aguilarsi@amigo.edu.co

Recibido: 17/04/2020. Modificado: 21/11/2020. Aceptado: 26/11/2020.

Abstract

Context: Nanoporous anodic alumina is a material of great interest due to its low density, high aspect ratio, and because it is possible to obtain highly ordered structures from it. In the last decades, researchers have focused on controlling the morphological characteristics of fabricated porous structures, particularly regarding their ordering. Recently, characterization of the ordering of these structures has started to migrate from qualitative to quantitative methods, leading to the development of more precise characterization tools.

Method: In this work, the ordering of the nanoporous anodic alumina (NAA) fabricated in oxalic acid 0,3 M was evaluated. Fast-Fourier transform was used to analyze the effect of anodizing potential in porous ordering. The regularity ratio was calculated based on the Fast-Fourier-transformed images generated from the top scanning electron microscopy (SEM) images of the obtained NAA samples.

Results: It was observed that increasing the anodizing potential decreases the regularity ratio for the evaluated potentials. Additionally, it was found that morphological characteristics such as pore diameter and interpore distance increase with the anodizing potential.

Conclusions: Highly ordered structures can be obtained through pure aluminum anodizing in 0,3 M oxalic acid at 40 V, 50 V, and 55 V. The regularity ratio is a useful instrument for the quantitative characterization of the ordering level of NAA structures. The NAA ordering level can be related with its properties, and then with NAA applications. The understanding of the anodizing potential effect on porous alumina ordering provides tools to improve the design of NAA-based devices.

Keywords: Nanoporous anodic alumina, regularity ratio, Fast-Fourier transform, ordering

Acknowledgments: The authors would like to thank Universidad Católica Luis Amigó for funding project number 57156, as well as Colciencias and Universidad de Antioquia (contract number 0636-2013).

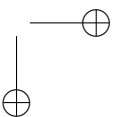
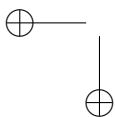
Language: Spanish

Open access



Cite this paper as: Aguilar-Sierra, S. M., Echeverría, F.: "Análisis cuantitativo del ordenamiento de alúmina anódica nanoporosa obtenida a diferentes potenciales de anodizado", Ingeniería, Vol. 26, Num. 1, pp. 15-24 (2021).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
<https://doi.org/10.14483/23448393.16164>



Resumen

Contexto: La alúmina anódica nanoporosa es un material de gran interés debido a su baja densidad, alta relación de aspecto y a que es posible obtener estructuras altamente ordenadas de ella. En las últimas décadas, los investigadores han concentrado sus esfuerzos en controlar las características morfológicas de los arreglos de poros fabricados, particularmente su ordenamiento. Recientemente, se empezó a migrar la caracterización del ordenamiento de las estructuras de cualitativa a cuantitativa, conllevando esto al desarrollo de herramientas de caracterización más precisas.

Método: En este trabajo se evaluó el efecto del potencial de anodizado en el ordenamiento de alúmina anódica nanoporosa (AAN) fabricada en ácido oxálico al 0,3 M. Se empleó la transformada rápida de Fourier (TRF) como herramienta para cuantificar el ordenamiento de la AAN fabricada. Los valores del grado de ordenamiento se obtuvieron mediante el cálculo del radio de regularidad basado en las imágenes obtenidas de las TRF generadas a partir de las imágenes superficiales de microscopía electrónica de barrido (MEB) de las muestras de AAN.

Resultados: Se observó que a medida que el potencial de anodizado aumenta, el radio de regularidad disminuye para los potenciales evaluados. Adicionalmente, se evidenció que el diámetro de poro y la distancia entre poros aumentan con el potencial de anodizado.

Conclusiones: Estructuras altamente ordenadas pueden ser obtenidas mediante el anodizado de aluminio puro en ácido oxálico al 0,3 M a 40 V, 50 V y 55 V. El cálculo del radio de regularidad representa un valioso instrumento para la caracterización cuantitativa del ordenamiento de las estructuras de AAN. La determinación del grado de ordenamiento de la AAN se relaciona con sus propiedades y por lo tanto con su aplicación. La comprensión del efecto del potencial de anodizado en el ordenamiento de los poros de alúmina proporciona herramientas para mejorar el diseño de dispositivos basados en la AAN.

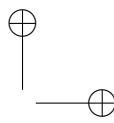
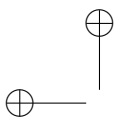
Palabras clave: Alúmina anódica nanoporosa, radio de regularidad, transformada rápida de Fourier, ordenamiento.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Universidad Católica Luis Amigó por la financiación del proyecto número: 57156 y a Colciencias y la Universidad de Antioquia, con el número de contrato: 0636-2013.

Idioma: Español

1. Introducción

La alúmina anódica nanoporosa (AAN) se ha convertido en una de las plataformas más utilizadas para producir varias nano-estructuras para aplicaciones en dispositivos magnéticos, electrónicos y ópticos [1]–[3]. Además, AAN es una plataforma adaptable para varios propósitos: obtención de sensores químicos y ópticos [4], aplicaciones biomédicas [5], [6], almacenamiento de energía [7], cristales fotónicos [8], catálisis [9], [10], como reflector Bragg [11], sistemas de liberación de medicamentos [12], entre otros. La AAN se caracteriza por una estructura en forma de panal de abejas con arreglos de poros empaquetados inscritos en celdas columnares hexagonales [1], [13], [15], este alto grado de ordenamiento se ha convertido en una de las características más sobresalientes de la AAN, por lo que los esfuerzos de los investigadores se han concentrado en fabricar estructuras cada vez más ordenadas [16]. Masuda y Fukuda [17] reportaron por primera vez el anodizado en dos pasos, en un proceso mediante el cual obtuvieron estructuras de AAN altamente auto-ordenadas. Posteriormente, Masuda y coinvestigadores, establecieron que existe un régimen de auto-ordenamiento que aplica para cada tipo de electrólito ácido [13], [17], [18]. Otros factores

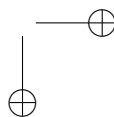
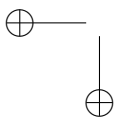


reportados como influyentes en el auto-ordenamiento de la AAN son la necesidad de superficies planas [19] y la regla del 10 % de porosidad propuesta por Nielsch *et al.* [20] para estructuras ordenadas. Otros investigadores han obtenido estructuras altamente ordenadas con porcentajes de porosidad diferentes al 10 % [21]–[23].

A lo largo de los años, las investigaciones de la AAN no solo se han centrado en producir arreglos de poros altamente ordenados, sino también en comprender el efecto de los parámetros del proceso de anodizado en las características morfológicas de las capas de AAN fabricadas y por lo tanto en sus propiedades. Se ha determinado que características morfológicas de la AAN como el diámetro de poro, la distancia entre poros y el espesor dependen directamente de los parámetros del proceso de anodizado como potencial, temperatura, tiempo de anodizado y electrolito [14], [24]–[28]. Se conoce que el potencial aplicado afecta principalmente el diámetro de poros y el segundo tiempo de anodizado influye directamente en el espesor de las capas obtenidas [24], [29].

La importancia del control de la forma de los poros de AAN y el grado de ordenamiento de las estructuras de AAN se observa en aplicaciones como los cristales fotónicos en los que se requieren estructuras porosas con altos grados de ordenamiento [30], ya que en los cristales fotónicos la longitud de onda de la luz es comparable con la periodicidad de la estructura, lo que resulta en un efecto de *band gap* fotónico [31]. También se ha reportado la influencia del ordenamiento de la AAN en su respuesta fotoluminiscente [32]. En otros estudios, se ha establecido la importancia de la geometría en los cálculos teóricos de los parámetros de reacciones de un sistema de catalizador monolítico [33]. Por lo tanto, la relevancia del ordenamiento de la AAN se evidencia con más claridad en el campo de la opto-electrónica [34] y la catálisis donde se hace de vital importancia contar con herramientas que proporcionen una caracterización más precisa de parámetros como el ordenamiento de las capas obtenidas para diseñar y fabricar dispositivos más exactos. Algunas de las estrategias que se han propuesto para caracterizar el ordenamiento de los arreglos de AAN incluyen métodos de coloración en la evaluación cuantitativa del ordenamiento de estructuras de AAN, empleando la función de distribución angular y la distribución de orientación angular [35], la función de autocorrelación [36] y el uso de herramientas como la transformada rápida de Fourier (TRF) que es común en el estudio de estructuras ordenadas y periódicas como arreglos porosos.

Se han utilizado varias estrategias para llevar a cabo los análisis de ordenamiento basados en las imágenes de TRF. Para el caso de las estructuras altamente ordenadas se ha planteado dibujar un perfil que atraviese los puntos brillantes observados en la TRF y posteriormente relacionar la intensidad máxima de dicha curva con el ancho del pico a la mitad de la altura [21], [37], [38]. En el caso de las estructuras con menor grado de ordenamiento, en las que no se observan puntos sino anillos concéntricos se ha propuesto obtener un promedio radial desde el centro de la TRF hacia el último anillo observado [39], [40]. Otros autores reportaron que el número de poros tiene influencia en los valores de radio de regularidad obtenidos y plantearon dividir el valor de radio de regularidad entre el número de poros [41]–[43]. Otros estudios revelaron que la intensidad y el ancho de los picos generados en el perfil trazado están altamente influenciados por el área superficial analizada y el número de poros [44]–[47], considerando el efecto del número de poros y del área analizada y no solo la intensidad y el ancho de pico medio de los perfiles generados a partir de las imágenes de las TRF, en las que la expresión que utilizaron para calcular el radio de regularidad (RR) es:



$$RR = \frac{H}{W_{1/2}} \frac{\sqrt{n}}{S^{3/2}} \quad (1)$$

Donde H es la intensidad del promedio radial, $W_{1/2}$ es el ancho del promedio radial en la mitad de su altura, n es el número de poros en la imagen analizada y S es el área superficial analizada.

En el presente trabajo se analizó la TRF obtenida de las imágenes superficiales de microscopía óptica de barrido de muestras de AAN con diferentes grados de ordenamiento, producidas a diferentes potenciales de anodizado. Se generaron perfiles radiales a partir de las TRF y posteriormente se calculó el radio de regularidad considerando el área superficial analizada y el número de poros. Los análisis cualitativos de las características morfológicas de las muestras de AAN a partir de las imágenes de microscopía electrónica de barrido (MEB) y de las TRF se correlacionaron con los resultados cuantitativos obtenidos con el cálculo del radio de regularidad.

2. Materiales y métodos

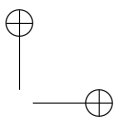
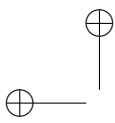
Se emplearon sustratos de aluminio de alta pureza Al 5N (99,999 % puro de Metalmen). Antes del anodizado, los sustratos se recoció a 500 °C durante 5 min y luego se electropulieron en una solución Brytal modificada a 3 V y 80 °C durante 10 min [48].

El anodizado se realizó en ácido oxálico al 0,3 M a potenciales de 40 V, 50 V, 55 V, 60 V y 75 V. El primer anodizado se realizó durante 6 h a 5 °C, la remoción del óxido se hizo empleando una mezcla de ácido fosfórico al 6 % p/p y ácido crómico al 4,8 % p/p a 60 °C. El tiempo de remoción de la capa de óxido y el tiempo del segundo anodizado se especifican en la Tabla I. El segundo anodizado se llevó a cabo durante un tiempo tal que el espesor de todas las muestras se mantuviera alrededor de 9 μm; el espesor de las capas de AAN se determinó mediante imágenes transversales de microscopía óptica y MEB.

Tabla I. Condiciones de anodizado empleadas.

Potencial (V)	Tiempo de remoción del óxido (min)	2 ^{do} tiempo de anodizado (min)	Espesor (μm)
40	40	200	9,4 ± 0,6
50	50	105	8,9 ± 0,5
55	55	80	9,2 ± 0,8
60	70	65	8,6 ± 0,7
75	75	15	8,6 ± 0,5

El software ImageJ 1.51j8 [49] fue usado para la estimación del diámetro de poro (d_p), la distancia entre poros (d_{int}), la porosidad (%p) y el número de poros a partir de las imágenes de MEB. Los cálculos de radio de regularidad se llevaron a cabo de acuerdo con la ecuación (1). Las TRF de las imágenes superficiales de MEB se generaron y analizaron con el software WSxM 5.0 [50]. Para llevar a cabo el proceso de electropulido se empleó una fuente de poder marca Matsusada Precision VOL500-20 y para anodizar se empleó una fuente marca BK Precision 9185. Para la



caracterización morfológica de las muestras se utilizaron un Microscopio Electrónico de Barrido (termoiónico) JEOL-JSM 6490LV y un microscopio óptico marca Nikon Eclipse E200.

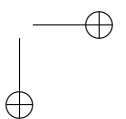
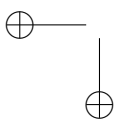
3. Resultados y discusión

En la Figura 1 se presenta el efecto del potencial de anodizado en el ordenamiento de las estructuras de AAN obtenidas. A la izquierda, las imágenes de MEB de las muestras de aluminio anodizadas en ácido oxálico a 40 V, 50 V, 55 V, 60 V y 75 V; las imágenes del centro corresponden a las TRF; a la derecha, los perfiles obtenidos del análisis radial de las TRF con los parámetros de corrección por área y número de poros. En las imágenes MEB puede observarse que de todos los potenciales se obtuvieron capas porosas de alúmina anódica, caracterizadas, en su mayoría, por arreglos hexagonales (40 V-60 V), a excepción de la muestra obtenida a 75 V. Se evidencia también que el tamaño de los poros aumenta con el potencial de anodizado y que, aparentemente, las muestras obtenidas a 60 V y 75 V tienen un menor grado de ordenamiento que las obtenidas a menores potenciales.

De las TRF puede observarse que todas las muestras presentan un anillo brillante, en ocasiones rodeado por hexágonos, puntos o halos. Se observa que el primer anillo, el más brillante de la TRF decrece en tamaño al aumentar el potencial. Las TRF de las muestras anodizadas a 40 V y 50 V (Figura 1 a y b) presentan seis puntos brillantes inscritos en el primer anillo exhibiendo la red hexagonal de la estructura anodizada. La TRF de la muestra de 55 V (Figura 1 c) presenta 18 puntos brillantes inscritos en el primer anillo. Por su parte, la muestra anodizada a 60 V (Figura 1 d) tiene un anillo brillante con un halo hexagonal difuso y, finalmente, la muestra anodizada a 75 V (Figura 1 e) presenta un anillo difuso.

El tamaño del primer anillo observado en las TRF está inversamente relacionado con el tamaño de la estructura que se repite, que en este caso serán los poros. Por lo que puede decirse que a medida que aumenta el potencial de anodizado aumenta el diámetro del poro. El número de puntos brillantes se relaciona con la red de ordenamiento de la estructura analizada, siendo una estructura hexagonal para las muestras de 40 V y 50 V (Figura 1 a y b) que exhibieron seis puntos brillantes y tres estructuras hexagonales con distintas orientaciones para la muestra de 55 V (Figura 1 c) que presentó 18 puntos brillantes, puede decirse que la imagen analizada presentaba poros altamente ordenados en tres direcciones de orientación distintas. A medida que el primer círculo de la TRF se hace más difuso, el ordenamiento de la estructura es menor como se observa para la muestra de 75 V de la Figura 1 e. Se observa entonces que al aumentar el potencial de anodizado desde 40 V hasta 75 V se disminuye el RR. Estos resultados coinciden con el hecho de que el potencial de máximo ordenamiento para muestras de AAN fabricadas en ácido oxálico al 0,3 M es 40 V [13], [17], [18] y cualquier potencial de anodizado que se aleje de este generará estructuras menos ordenadas como lo reportado en el estudio realizado por Rao *et al.* [51] en el que concluyen que al disminuir el potencial desde 50 V hasta 20 V se observa un menor grado de ordenamiento.

En la Figura 2 se presenta el efecto del potencial de anodizado en el d_p y la d_{int} de las capas de AAN obtenidas. En la Figura 2 puede observarse que tanto el d_p como la d_{int} incrementan al aumentar el potencial de anodizado. También se observa que las muestras anodizadas a 40 V pro-



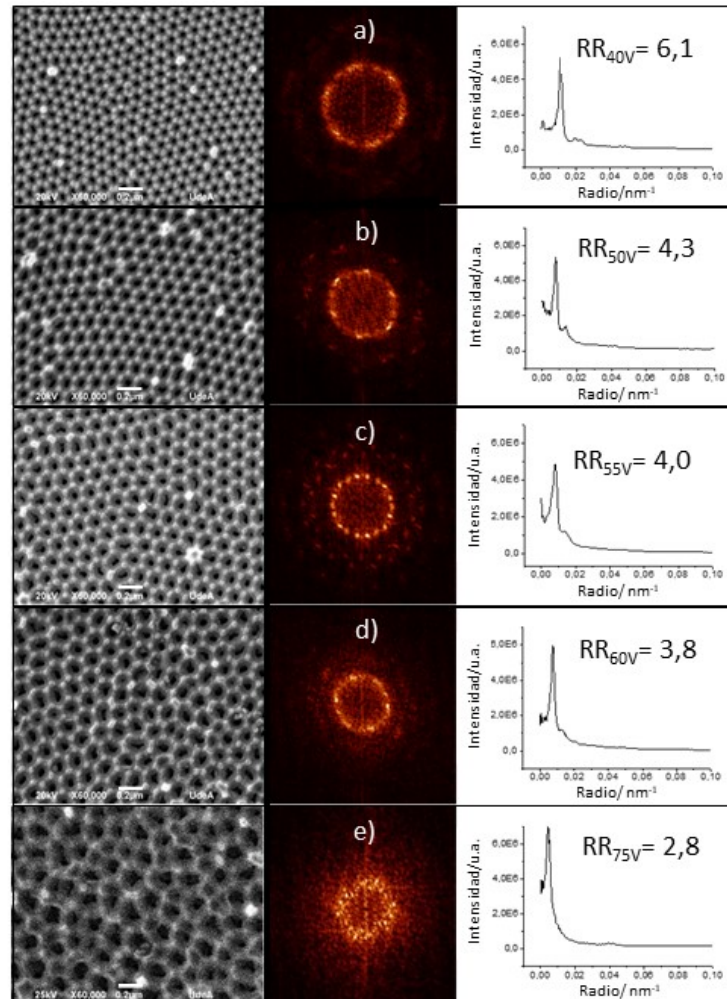


Figura 1. Imágenes MEB con la TRF y el perfil radial promedio de los perfiles generados en la TRF para la AAN producida en ácido oxálico al 0,3 M a 5 °C. (a) 40 V, (b) 50 V, (c) 55 V, (d) 60 V y (e) 75 V. El área superficial analizada fue $3,48 \mu\text{m}^2$ y la escala blanca del MEB es de $0,2 \mu\text{m}$.

ducen las barras de error más pequeñas y que las muestras de 75 V exhiben las barras de error más grandes. El tamaño de dichas barras de error está relacionado con la homogeneidad de las estructuras, por lo que puede decirse que la muestra obtenida a 40 V es más homogénea que la muestra obtenida a 75 V. Resultados que concuerdan con el régimen de auto-ordenamiento reportado para las muestras anodizadas en ácido oxálico [16], [18]. Debe tenerse en consideración que las tendencias observadas son solo aplicables a las estructuras de AAN obtenidas en ácido oxálico 0,3 M para los potenciales evaluados.

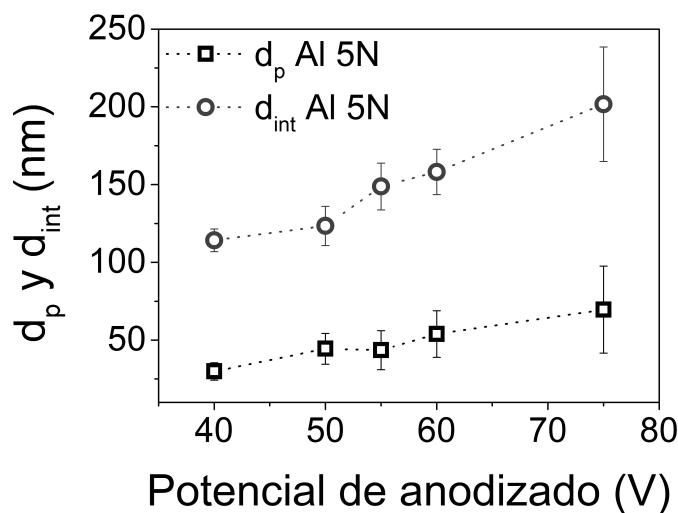


Figura 2. Efecto del potencial de anodizado en el d_p y la d_{int} de la AAN obtenida en ácido oxálico al 0,3 M a 5 °C a 40 V, 50 V, 55 V, 60 V y 75 V.

4. Conclusiones

En este trabajo fue posible cuantificar el ordenamiento de las estructuras de AAN obtenidas a diferentes potenciales de anodizado, permitiendo correlacionar el potencial de anodizado con el grado de ordenamiento o radio de regularidad de las estructuras de AAN fabricadas. Se obtuvieron estructuras altamente ordenadas mediante el anodizado de aluminio puro en ácido oxálico al 0,3 M a 40 V, 50 V y 55 V considerando que a medida que el potencial de anodizado aumenta el radio de regularidad disminuye.

El radio de regularidad calculado con base en las imágenes de TRF obtenidas a partir de las imágenes MEB de la superficie de las muestras de AAN, representa un valioso instrumento para la caracterización cuantitativa del ordenamiento de los poros.

En relación con el efecto del potencial de anodizado en las características morfológicas de las estructuras de alúmina anódica porosa obtenidas, pudo observarse que el diámetro de poro y la distancia entre poros aumentan con el aumento del potencial de anodizado.

La comprensión del efecto de los parámetros del proceso de anodizado en el ordenamiento de las estructuras de AAN proporciona una base para diseñar con mayor precisión dispositivos basados en la AAN según sea la aplicación requerida.

Referencias

- [1] A. M. Abd-Elnaiem y A. Gaber, "Parametric Study on the Anodization of Pure Aluminum Thin Film Used in Fabricating Nano-Pores Template", *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 8, no. 7, pp. 9741-9751, 2013. ↑16

- [2] J. Zhang, Z. Li, Z. Zhang, T. Wu y H. Sun, "Optical and Magnetic Properties of Porous Anodic Alumina/Ni Nanocomposite Films", *J. Appl. Phys.*, vol. 113, no. 24, pp. 244-305, 2013. 10.1063/1.4812466. <https://doi.org/10.1063/1.4812466> ↑16
- [3] C. T. Wu *et al.*, "Design of artificial Hollow Moth-Eye Structures Using Anodic Nanocones for High- Performance Optics", *Chem. Mater.*, vol. 22, no. 24, pp. 6583-6589, 2010. 10.1021/cm102408d. <https://doi.org/10.1021/cm102408d> ↑16
- [4] A. Santos y T. Kumeria, "Nanoporous anodic alumina for optical biosensing", en *Nanoporous Alumina*, no. ago., Suiza: Springer International Publishing, 2015, pp. 219-247. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20334-8_7 ↑16
- [5] P. E. Petrochenko *et al.*, "Nanoporous Aluminum Oxide Membranes Coated with Atomic Layer Deposition-Grown Titanium Dioxide for Biomedical Applications: An in Vitro Evaluation", *J. Biomed. Nanotechnol.*, vol. 11, no. 12, pp. 2275-2285, 2015. <https://doi.org/10.1166/jbn.2015.2169> ↑16
- [6] M. Singh y D. Gobind, "Highly Ordered Anodic Porous Alumina Membrane and its Surface Modification Approaches for Biomedical Application", *IOSR J. Appl. Chem.*, vol. 7, no. 1, pp. 17-34, 2014. <https://doi.org/10.9790/5736-07111734> ↑16
- [7] P. Banerjee, I. Perez, L. Henn-Lecordier, S. B. Lee y G.W. Rubloff, "Nanotubular Metal-Insulator-Metal Capacitor Arrays for Energy Storage", *Nat. Nanotechnol.*, vol. 4, no. 5, pp. 292-296, 2009. <https://doi.org/10.1038/nnano.2009.37> ↑16
- [8] S. Sukarno, C. S. Law y A. Santos, "Realisation and Optical Engineering of Linear Variable Bandpass Filters in Nanoporous Anodic Alumina Photonic Crystals", *Nanoscale*, no. May, 2017. <https://doi.org/10.1039/C7NR02115A> ↑16
- [9] P. C. Stair *et al.*, "Novel, Uniform Nanostructured Catalytic Membranes", *Top. Catal.*, vol. 39, no. 3-4, pp. 181-186, 2006. <https://doi.org/10.1007/s11244-006-0055-0> ↑16
- [10] A. Mutalib, J. Zhou, M. R. Nussio, D. Losic, J. G. Shapter y N. H. Voelcker, "Pore Spanning lipid bilayers on silanised nanoporous alumina membranes", *Proceedings of SPIE*, 2008, vol. 7267, no. May, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1117/12.808769> ↑16
- [11] Y. Chen *et al.*, "Biomimetic Nanoporous Anodic Alumina Distributed Bragg Reflectors in the Form of Films and Microsized Particles for Sensing Applications", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 7, no. 35, pp. 19816-19824, 2015. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b05904> ↑16
- [12] M. Porta-i-Batalla, C. Eckstein, E. Xifré-Pérez, P. Formentín, J. Ferré-Borrull y L. F. Marsal, "Sustained, Controlled and Stimuli-Responsive Drug Release Systems Based on Nanoporous Anodic Alumina with Layer By-Layer Polyelectrolyte", *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 11, no. 372, pp. 1-9, 2016. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1585-4> ↑16
- [13] H. Masuda, F. Hasegawa y S. Ono, "Self-Ordering of Cell Arrangement of Anodic Porous Alumina Formed in Sulfuric Acid Solution", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 144, no. 5, p. L127, 1997. <https://doi.org/10.1149/1.1837634> ↑16, 19
- [14] F. Keller, M. S. Hunter y D. L. Robinson, "Structural Features of Oxide Coatings on Aluminum", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 100, no. 9, pp. 411-419, 1953. <https://doi.org/10.1149/1.2781142> ↑17
- [15] J. P. O'Sullivan y G. C. Wood, "The Morphology and Mechanism of Formation of Porous Anodic Films on Aluminium", , vol. 317, no. 1531, pp. 511-543, 1970. <https://doi.org/10.1098/rspa.1970.0129> ↑16
- [16] A. Christoulaki, C. Moretti, A. Chennevière, E. Dubois y N. Jouault, "Improving Structural Features of Nanoporous Alumina Using Deuterated Electrolytes", *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 303, no. mar., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110201> ↑16, 20
- [17] H. Masuda y K. Fukuda, "Ordered Metal Nanohole Arrays Made by a Two-Step Replication of Honeycomb Structures of Anodic Alumina", *Science*, vol. 268, pp. 1466-1468, 1995. <https://doi.org/10.1126/science.268.5216.1466> ↑16, 19
- [18] H. Masuda, K. Yada y A. Osaka, "Self-Ordering of Cell Configuration of Anodic Porous Alumina with Large-Size Pores in Phosphoric Acid Solution", *J. Appl. Phys.*, vol. 37, no. 11A, pp. 1340-1342, 1998. <https://doi.org/10.1143/JJAP.37.L1340> ↑16, 19, 20
- [19] O. Jessensky, F. Müller y U. Gösele, "Self-Organized Formation of Hexagonal Pore Structures in Anodic Alumina", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 145, no. 11, pp. 3735-3740, 1998. <https://doi.org/10.1149/1.1838867> ↑17
- [20] K. Nielsch, J. Choi, K. Schwirn, R. B. Wehrspoh y U. Gösele, "Self-Ordering Regimes of Porous Alumina: The 10

- Porosity Rule”, *Nano Lett.*, vol. 2, no. 7, pp. 677-680, 2002. <https://doi.org/10.1021/nl1025537k> ↑17
- [21] G. D. Sulka y K. G. Parkola, “Temperature Influence on Well-Ordered Nanopore Structures Grown by Anodization of Aluminium in Sulphuric Acid”, *Electrochim. Acta*, vol. 52, no. 5, pp. 1880-1888, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.07.053> ↑17
- [22] O. Nishinaga, T. Kikuchi, S. Natsui y R. O. Suzuki, “Rapid Fabrication of Self-Ordered Porous Alumina with 10-/Sub-10-Nm-Scale Nanostructures By Selenic Acid Anodizing.”, *Sci. Rep.*, vol. 3, p. 2748, 2013. <https://doi.org/10.1038/srep02748> ↑17
- [23] S. Ono, M. Saito, M. Ishiguro y H. Asoh, “Controlling Factor of Self-Ordering of Anodic Porous Alumina”, *J. Electrochem. Soc.*, vol. 151, no. 8, p. B473, 2004. <https://doi.org/10.1149/1.1767838> ↑17
- [24] B. Sellarajan, M. Sharma, S. K. Ghosh, H. S. Nagaraja, H. C. Barshilia y P. Chowdhury, “Effect of Electrolyte Temperature on The Formation of Highly Ordered Nanoporous Alumina Template”, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 224, pp. 262-270, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.12.045> ↑17
- [25] M. A. Kashi y A. Ramazani, “The Effect of Temperature and Concentration on The Self-Organized Pore Formation in Anodic Alumina”, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 38, no. 14, pp. 2396-2399, 2005. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/14/015> ↑17
- [26] P. G. Wernick, S., Pinner y R., Sheasby, *The Surface Treatment and Finishing of Aluminum and its Alloys*, 5a ed., Gran Bretaña: ASM International, 1987. ↑17
- [27] L. Zaraska, A. Brudzisz, E. Wierzbicka y G. D. Sulka, “The Effect of Electrolyte Change on The Morphology and Degree of Nanopore Order of Porous Alumina Formed By Two-Step Anodization”, *Electrochimica Acta*, vol. 198, pp. 259-267, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.03.050> ↑17
- [28] C. K. Chung, M. W. Liao, H. C. Chang y C. T. Lee, “Effects of Temperature and Voltage Mode on Nanoporous Anodic Aluminum Oxide Films By One-Step Anodization”, *Thin Solid Films*, vol. 520, no. 5, pp. 1554-1558, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.08.053> ↑17
- [29] W. Lee y S.-J. Park, “Porous Anodic Aluminum Oxide: Anodization and Templated Synthesis of Functional Nanostructures”, *Chem. Rev.*, vol. 114, no. 15, pp. 7487-7556, 2014. <https://doi.org/10.1021/cr500002z> ↑17
- [30] I. V. Roslyakov *et al.*, “Growth of Porous Anodic Alumina on Low-Index Surfaces of Al Single Crystals”, *J. Phys. Chem. C*, vol. 121, no. 49, pp. 27511-27520, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b09998> ↑17
- [31] T. Fukuda y V. I. Chani (Eds.), *Shaped Crystals: Growth by Micro Pulling Down Technique*, Springer, 2007. ↑17
- [32] A. Rauf, M. Mehmood, M. Ahmed, M. ul Hasan y M. Aslam, “Effects of Ordering Quality of The Pores on The Photoluminescence of Porous Anodic Alumina Prepared in Oxalic Acid”, *J. Lumin.*, vol. 130, no. 5, pp. 792-800, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2009.11.035> ↑17
- [33] D. E. Boldrini, G. M. Tonetto y D. E. Damiani, “Overall Effectiveness Factor for Slab Geometry in a Three-Phase Reaction System”, *Int. J. Chem. React. Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 417-427, 2014. <https://doi.org/10.1515/ijcre-2014-0018> ↑17
- [34] C. Toccafondi, W. J. Stepniowski, M. Leoncini y M. Salerno, “Advanced Morphological Analysis of Patterns of Thin Anodic Porous Alumina”, *Mater. Charact.*, vol. 94, pp. 26-36, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.05.003> ↑17
- [35] C. Cheng, “Quantitative evaluation of self-ordering in anodic porous alumina”, en *Electro-Chemo-Mechanics of Anodic Porous Alumina Nano-Honeycombs: Self-Ordered Growth and Actuation*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2015, pp. 91-104. https://doi.org/10.1007/978-3-662-47268-2_6 ↑17
- [36] L. Sacco, I. Florea, M. Châtelet y C. Cojocaru, “Investigation of Porous Anodic Alumina Templates Formed By Anodization of Single-Crystal Aluminum Substrates”, *Thin Solid Films*, vol. 660, no. abril, pp. 213- 220, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.06.015> ↑17
- [37] X. Z. Liu, M. X. Xu, Y. M. Tian, M. Shang y P. Zhang, “Regularity Control of Porous Anodic Alumina and Photodegradation Activity of Highly Ordered Titania Nanostructures”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 16, pp. s341-s344, 2006. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(06\)60206-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(06)60206-9) ↑17
- [38] C. Wang, S. Tanaka, K. Saito, T. Shimizu y S. Shingubara, “Fabrication of Ordered Arrays of Anodic Aluminum Oxide Pores with Interpore Distance Smaller Than the Pitch of Nano-Pits Formed By Ion Beam Etching”, *J. Mater.Sci. Nanotechnol.*, vol. 1, no. 1, pp. 1-6, 2014. <https://doi.org/10.15744/2348-9812.1.S105> ↑17
- [39] W. J. Stepniowska, A. Nowak-Stepniowska, A. Presz, . Czujko y R. A. Varin, “The Effects of Time and Temperature on the Arrangement of Anodic Aluminum Oxide Nanopores”, *Mater. Charact.*, vol. 91, pp. 1-9, 2014.

- <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.01.030> ↑17
- [40] C. Toccafondi, W. J. Stepniowski, M. Leoncini y M. Salerno, "Advanced Morphological Analysis of Patterns of Thin Anodic Porous Alumina", *Materials Characterization*, vol. 94, pp. 26-36, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.05.003> ↑17
- [41] M. Michalska-Domańska, M. Norek, W. J. Stepniowski y B. Budner, "Fabrication of High Quality Anodic Aluminum Oxide (AAO) on Low Purity Aluminum - A Comparative Study with The AAO Produced on High Purity Aluminum", *Electrochim. Acta*, vol. 105, pp. 424-432, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.04.160> ↑17
- [42] L. Zaraska, W. J. Stepniowski, M. Jaskuła y G. D. Sulka, "Analysis of Nanopore Arrangement of Porous Alumina Layers Formed By Anodizing in Oxalic Acid At Relatively High Temperatures", *Appl. Surf. Sci.*, vol. 305, pp. 650-657, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.03.154> ↑17
- [43] R. Syed, D. Sen, K. V. Mani Krishna y S. K. Ghosh, "Fabrication of Highly Ordered Nanoporous Alumina Membranes: Probing Microstructures by SAXS, FESEM and AFM", *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 264, no. December 2017, pp. 13-21, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.12.034> ↑17
- [44] A. M. Abd-Elnaiem, A. M. Mebed, W. J. Stepniowski y T. Czujko, "Characterization of Arrangement and Geometry of Porous Anodic Alumina Formed By One-Step Anodization of Al-1 Wt% Si Thin Films", *Surf. Coatings Technol.*, vol. 307, pp. 359-365, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.013> ↑17
- [45] W. J. Stepniowski, T. Durejko, M. Michalska-Domańska, M. Łazińska y J. Aniszewska, "Characterization of Nanoporous Anodic Aluminum Oxide Formed on Laser Pre-Treated Aluminum", *Mater. Charact.*, vol. 122, pp. 130-136, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.10.034> ↑17
- [46] W. J. Stepniowski, M. Michalska-Domańska, M. Norek y T. Czujko, "Fast Fourier Transform Based Arrangement Analysis of Poorly Organized Alumina Nanopores Formed Via Self-Organized Anodization in Chromic Acid", *Mater. Lett.*, vol. 117, pp. 69-73, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.11.099> ↑17
- [47] K. S. Choudhari, S. D. Kulkarni, C. Santhosh y S. D. George, "Photoluminescence Enhancement and Morphological Properties of Nanoporous Anodic Alumina Prepared in Oxalic Acid with Varying Time and Temperature", *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 271, no. April, pp. 138-145, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.06.004> ↑17
- [48] S. M. Aguilar-Sierra y F. Echeverría E, "Improvement of Electropolishing of 1100 Al Alloy for Solar Thermal Applications", *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 27, no. 3, pp. 1387-1395, Mar. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3212-2> ↑18
- [49] C. A. Schneider, W. S. Rasband y K. W. Eliceiri, "NIH Image To ImageJ: 25 Years of Image Analysis", *Nat. Methods*, vol. 9, pp. 671-675, 2012. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089> ↑18
- [50] I. Horcas, R. Fernandez, J. M. Gomez-Rodriguez, J. Colchero, J. Gomez-Herrero y A. M. Baro, "WSXM: A Software for Scanning Probe Microscopy and A Tool for Nanotechnology", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 78, no. 1, p. 013705, 2007. <https://doi.org/10.1063/1.2432410> ↑18
- [51] Y. L. Rao, V. Anandan y G. Zhang, "Fast Fourier Transform Analysis of Pore Pattern in Anodized Alumina Formed at Various Conditions", *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 5, no. 12, pp. 2070-2075, 2005. <https://doi.org/10.1166/jnn.2005.509> ↑19

Sara María Aguilar Sierra

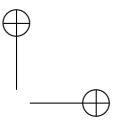
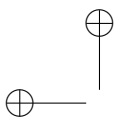
Ingeniera de Materiales, Magíster en Ingeniería y Doctora en Ingeniería de Materiales de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia; docente del Programa de Ingeniería Industrial de la Universidad Católica Luis Amigó, 2019-actual.

Correo electrónico: sara.aguilarsi@amigo.edu.co

Félix Echeverría Echeverría

Ingeniero Metalúrgico y Magíster en Ingeniería de la Universidad Industrial de Santander, Santander, Colombia; PhD in Corrosion, University of Manchester Institute of Science and Technology, Manchester, Inglaterra; docente del Programa de Ingeniería de Materiales de la Universidad de Antioquia, 1999-actual. Líder del Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales CIDEMAT - Universidad de Antioquia.

Correo electrónico: felix.echeverria@udea.edu.co



Research

Design of a Linear Quadratic Gaussian Controller and a Self-Tuning Regulator Based on Pole Placement to Control the Voltage of a DC Generator

Diseño de un controlador lineal cuadrático gaussiano y un controlador autosintonizado por asignación de polos para el control del voltaje de un generador CD

Luis Eduardo García Jaimes¹, David Piedrahíta Flórez¹

¹Facultad de Ingeniería, Politécnico Colombiano JIC. (Medellín, Colombia).
correspondence email: legarcia47@gmail.com

Recibido: 07/08/2020. Modificado: 30/10/2020. Aceptado: 27/11/2020.

Abstract

Context: This paper presents the design of a Linear Quadratic Gaussian controller to regulate the voltage of a DC generator, and its performance is compared with that of a self-tuning regulator based on pole placement.

Method: To implement these control strategies, a prototype DC generator is used, and the mathematical model of the system is obtained by means of non-parametric identification. The theoretical bases and the design of the two control strategies are presented, and the performance comparison of the two controllers is performed by using metrics from their integral error and time response.

Results: Integral error and time response metrics show that, although the performance of the Linear Quadratic Gaussian controller is slightly higher than that presented by the self-tuning controller, system responses are stable with both control strategies, as well as with a good speed response and a steady-state error equal to zero.

Conclusions: A Linear Quadratic Gaussian controller and self-tuned control strategies are a good alternative to conventional control and generate an adequate process control that is in line with system requirements.

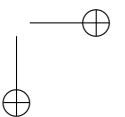
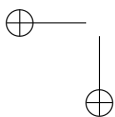
Keywords: Kalman filter, LQR controller, STR controller, cost function

Language: Spanish

Open access



Cite this paper as: García, L. E., Piedrahíta, D.: Diseño de un controlador lineal cuadrático gaussiano y un controlador autosintonizado por asignación de polos para el control del voltaje de un generador CD. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 1, pp. 25-40 (2021). © The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
<https://doi.org/10.14483/23448393.16719>



Resumen

Contexto: En este artículo se presenta el diseño de un controlador lineal cuadrático gaussiano para regular el voltaje de un generador CD y se compara su desempeño con el de un regulador autoajustable sintonizado por asignación de polos.

Método: Para implementar estas estrategias de control, se utiliza el prototipo de un generador CD y se obtiene el modelo matemático del sistema utilizando identificación no paramétrica, se presentan las bases teóricas y el diseño de las dos estrategias de control y se realiza la comparación del desempeño de los dos controladores utilizando métricas de la integral del error y respuesta temporal.

Resultados: Las métricas de la integral del error y las de respuesta temporal muestran que, aunque el desempeño del controlador lineal cuadrático gaussiano es ligeramente superior al presentado por el controlador autoajustable por asignación de polos, con las dos estrategias de control las respuestas del sistema son estables, con buena velocidad de respuesta y error de estado estable igual a cero.

Conclusiones: Las estrategias de control lineal cuadrático gaussiano y el control autosintonizado son una buena alternativa al control convencional y generan un adecuado control del proceso, acorde con los requerimientos del sistema.

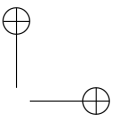
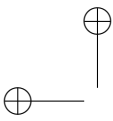
Palabras clave: filtro de Kalman, controlador LQR, controlador STR, función de costo

Idioma: Español

1. Introducción

La aplicación intensiva de las técnicas del control automático de procesos se basa en la evolución de las tecnologías de medición y control aplicadas al ambiente industrial. El crecimiento en la complejidad de los procesos industriales ha traído como consecuencia que el control automático de los mismos se haya desarrollado a gran velocidad, y que los modos de control convencional estén siendo reemplazados por controladores óptimos como una estrategia clave para mejorar la competitividad de la empresa y alcanzar objetivos que de otro modo difícilmente podrían conseguirse.

En la literatura se encuentran diferentes publicaciones que hacen referencia al control óptimo y específicamente al control lineal cuadrático gaussiano (LQG). En [1] se describe la implementación de un controlador LQG y de un regulador lineal cuadrático (LQR) para controlar la dinámica del vuelo lateral y longitudinal en la simulación de vuelo de una aeronave con el fin de lograr una estabilidad robusta. En el trabajo realizado por [2] se presenta el diseño de dos estrategias de control, un controlador LQG y un controlador DMPC (Discrete Time Model Predictive Control) para regular la velocidad de una turbina de vapor acoplada a un generador CD, con el fin de mantener constante la velocidad ante variaciones de presión en la tubería de vapor. Rodríguez, Murilo y Silva [3] investigan el comportamiento de un sistema de dirección eléctrica asistida al aplicar un controlador LQG discreto; implementan este controlador debido a su estabilidad y robustez aun cuando el sistema se encuentra sometido a ruidos y perturbaciones. En [4] se implementa una plataforma experimental de un helicóptero de dos grados de libertad pivotado, se estima el modelo matemático que describe el comportamiento del sistema y se diseña un controlador PID y un controlador LQR. Finalmente, se realiza la comparación de los controladores para determinar su desempeño frente a perturbaciones, en [5] hace referencia al diseño de un algoritmo de control óptimo para el sistema HVAC de un edificio e introduce un algoritmo de control jerárquico que se compone de controladores PID y un controlador LQR. El controlador LQR minimiza una función de coste cuadrático que tiene dos



términos cuadráticos: uno tiene en cuenta el nivel de confort y el otro representa el esfuerzo de control, es decir la cantidad de energía consumida. En [6] se propone un controlador LQG de velocidad para suprimir las vibraciones torsionales en el sistema de accionamiento de un motor con una carga de dos masas giratorias. Debido a la dificultad de medir la velocidad de la carga y el par del eje, se utiliza el filtro de Kalman como un estimador de orden completo. Se realizan simulaciones para comparar el desempeño del controlador LQG con un controlador PI convencional. [7] presenta un artículo en el cual realiza el diseño de un algoritmo de control basado en la optimización de los parámetros del controlador LQG mediante el uso de algoritmos genéticos (GA) para controlar la velocidad del motor de CD. Los resultados obtenidos muestran que el enfoque seleccionado utilizado en la elección de la matriz Q y R logra un muy buen rendimiento y refleja la eficiencia y la accesibilidad a los requisitos de diseño del enfoque propuesto.

El objetivo de este trabajo es diseñar un controlador LQG y un controlador STR para el voltaje producido por una planta prototipo constituida por un sistema de un motor y un generador CD, y comparar el desempeño de los dos controladores, utilizando diferentes métricas.

Con este artículo se busca incentivar a otros académicos para que se interesen por esta línea de trabajo del área de la Ingeniería de Control y se pretende demostrar que es posible, utilizando prototipos de bajo costo, implementar técnicas avanzadas de control con buenos resultados, acordes a las exigencias impuestas por el avance y desarrollo de sistemas de control.

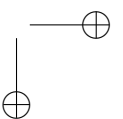
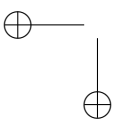
Metodológicamente el artículo inicia con la descripción del sistema a controlar y la obtención de su modelo matemático utilizando identificación no paramétrica, a continuación, se plantean los conceptos básicos de los controladores STR y LQG, se estiman sus parámetros y, finalmente, se implementan en la planta prototipo, para comparar su desempeño y analizar los resultados obtenidos.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción del sistema

La Figura 1 muestra la planta prototipo objeto de estudio, la cual está compuesta por: la unidad electromecánica, encargada de la generación del voltaje que se desea controlar en el sistema, está constituida por dos motores CD de 24 V, uno de ellos trabajando como motor propiamente dicho y el otro, unido al primer motor mediante un acople flexible, cumpliendo la función de generador; la unidad de medición, encargada de adecuar el valor de la variable a controlar, formada por un divisor de voltaje que convierte la salida proveniente del generador CD en una señal de 0 a 4,5 voltios; el sistema de adquisición de datos y control basado en una tarjeta Arduino UNO®, un módulo driver dual L298N para motores CD, el cual maneja la potencia mediante la modulación del ancho de pulso (PWM), cuya amplitud depende de la señal de control proveniente del computador en el cual se implementan los algoritmos de control en la plataforma Labview® y, finalmente, una fuente de alimentación con salida de 24VCD a 10 A.

La Figura 2 muestra el diagrama eléctrico que interconecta las unidades de funcionamiento que conforman el sistema.



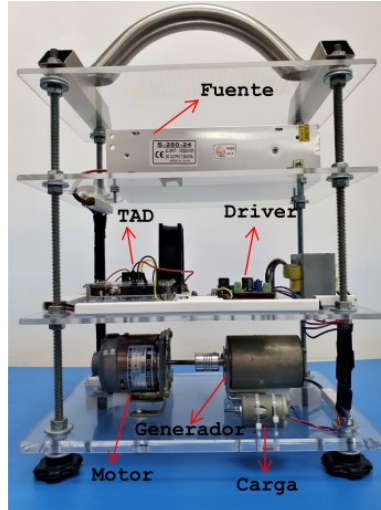


Figura 1. Prototipo del generador CD utilizado en el trabajo

2.2. Obtención del modelo matemático del prototipo del generador CD

La identificación de sistemas permite obtener el modelo matemático que describe la dinámica del sistema a partir de datos experimentales [8]. El prototipo del generador CD se sometió a diferentes señales de entrada de tipo escalón, en un rango del 0 al 100 %, con incrementos de 10 % como se muestra en la Figura 3.

Por las características de la respuesta y las del prototipo del generador CD, su dinámica se aproximó a un modelo de segundo orden con retardo (SOR) [9], [10], se utilizó el método de Stark,

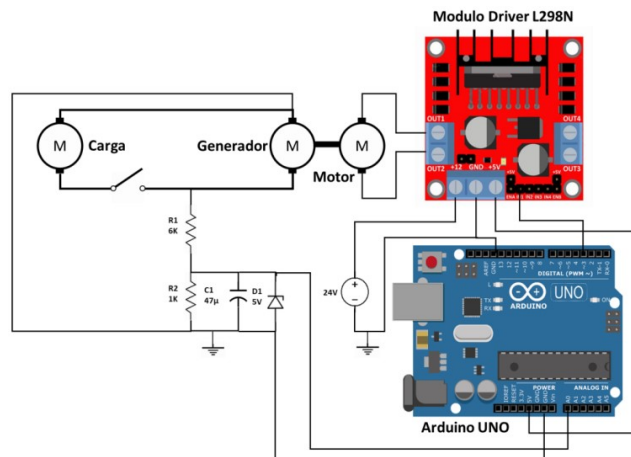


Figura 2. Diagrama eléctrico del prototipo

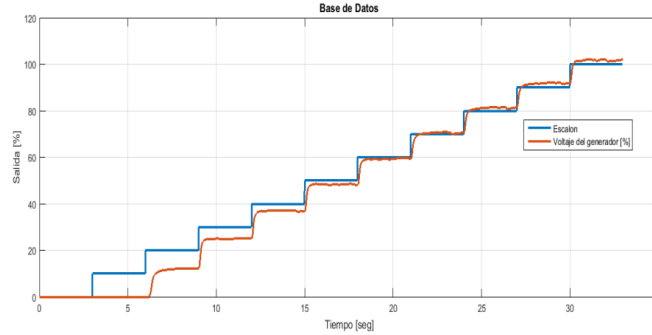


Figura 3. Base de datos para la identificación del sistema

también llamado método de los tres puntos [11], que corresponden a los tiempos requeridos para la respuesta, ante una señal en forma de escalón, alcance el 15 %, el 45 % y el 75 % del valor final. El método se aplicó a cada uno de los escalones y luego se promediaron los resultados, la función de transferencia estimada se da en la ecuación (1).

$$G(s) = \frac{361,71 e^{-0,0532 S}}{S^2 + 38,64 S + 315,46} \quad (1)$$

2.3. Controlador STR por asignación de polos

Sea la planta definida por la función de transferencia dada en la ecuación (2):

$$G_p(z) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m}} * z^{-d} \quad (2)$$

Para dicha planta, es posible obtener un controlador representado por la ecuación (3).

$$D(z) = \frac{Q(z^{-1})}{P(z^{-1})} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_v z^{-v}}{1 + p_1 z^{-1} + \dots + p_u z^{-u}} \quad (3)$$

De modo que sus polos de lazo cerrado queden ubicados en el lugar deseado [12]. El orden del numerador y del denominador de la función de transferencia del controlador deben ser: $v = m$ y $u = m + d$ respectivamente. La ecuación característica deseada para el sistema en lazo cerrado está dada por:

$$P(z^{-1})A(z^{-1}) + Q(z^{-1})B(z^{-1})z^{-d} = \Delta(z^{-1}) \quad (4)$$

En donde:

$$\Delta(z^{-1}) = 1 + \alpha_1 z^{-1} + \alpha_2 z^{-2} + \dots + \alpha_l z^{-l} \quad (5)$$

La ecuación característica deseada $\Delta(z^{-1})$ se determina a partir de las especificaciones de diseño establecidas, el orden l de la misma está dado por: $l = 2m + d$. Los parámetros del controlador se obtienen al resolver la ecuación (4) aplicando la ecuación (6).

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{m+d} \\ q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_1 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_1 & a_1 & \vdots & 0 & b_1 & 0 & \vdots & 0 \\ \vdots & a_2 & & 0 & b_2 & b_1 & & 0 \\ a_m & \vdots & & 0 & \vdots & \vdots & & b_1 \\ 0 & 0 & & 0 & b_m & & \dots & \\ \vdots & \vdots & \dots & a_m & 0 & b_m & \dots & b_m \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 - a_1 \\ \alpha_2 - a_2 \\ \vdots \\ \alpha_m - a_m \\ \alpha_{m+1} \\ \vdots \\ \alpha_{2m+1} \\ -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Por último, los parámetros hallados en la ecuación (6) se reemplazan en la ecuación (3) obteniendo así la función de transferencia del controlador STR.

2.4. Regulador lineal cuadrático LQG

Para diseñar el controlador LQG se aplica el principio de separación que permite calcular en forma independiente la matriz de realimentación de ganancia K del regulador lineal cuadrático (LQR) y un estimador de estados tipo Kalman, que posteriormente se combinan para formar el controlador [13], [14]. Para calcular la matriz de ganancia K se utiliza una función de costo cuadrática que minimiza el índice de desempeño presentado en la ecuación (7) [15]:

$$J(i, N) = \frac{1}{2}x^T(N).S.x(N) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N-1} x^T(k).Q.x(k) + u^T(k).R.x(k) \quad (7)$$

En donde Q y R son matrices de peso positivas definidas y se seleccionan para penalizar a algunos estados o a algunas entradas más que a otras [16], [17]. S es una matriz semidefinida positiva. Para calcular el control LQR, se parte del sistema definido por la ecuación (8) y la ecuación (9):

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(x) \quad (8)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (9)$$

El objetivo es encontrar la señal del control $u(k)$ que lleve al sistema dado por la ecuación (8), del estado inicial $x(k) = x(0)$ al estado final $x(N) = x(f)$ minimizando la función de coste cuadrática definida por la ecuación (7). Utilizando un procedimiento iterativo se puede obtener el paso del estado k al estado N [18], lo que da como resultado:

$$u(k) = -K(k) x(k) \quad (10)$$

$$K(k) = [R + B^T S(k+1)B]^{-1} B^T S(k+1)A \quad (11)$$

$$S(k+1) = [A - BK(k)]^T S(k+1)[A - BK(k)] + Q + K^T(k)RK(k) \quad (12)$$

Las ecuaciones (10), (11) y (12) generan el controlador LQR para el sistema discreto descrito por la ecuación (8). La ecuación (12) se conoce como la ecuación de Riccati. En la Figura 4 se presenta un diagrama de bloques del sistema de control LQR.

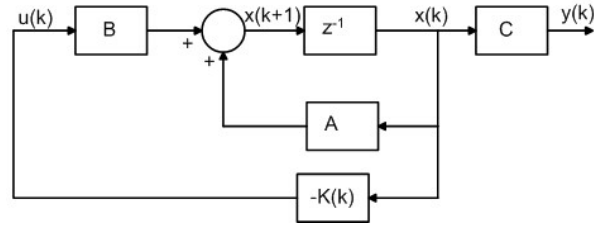


Figura 4. Diagrama de bloques de control LQR

2.5. Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un algoritmo óptimo recursivo basado en el modelo de espacio de estados y su objetivo es estimar los estados de una manera óptima y, dada su función de filtro, eliminar el ruido; de manera que se minimice el índice del error cuadrático medio [19]. Si se considera el sistema discreto:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Gv(k) \quad (13)$$

$$y(k) = Cx(k) + w(k) \quad (14)$$

En donde $v(k)$ y $w(k)$ son el ruido del proceso y de la medición respectivamente. Para obtener el filtro de Kalman se parte de la ecuación del observador de estados normal, pero teniendo en cuenta los efectos del ruido para el cálculo de la matriz de ganancia L . Esta matriz debe elegirse de forma que dé la mejor estimación del estado del sistema y que rechace los efectos de los ruidos. Esta elección define el observador óptimo conocido como filtro de Kalman dado por la ecuación (15) [20]

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L[y(k) - C\hat{x}(k)] \quad (15)$$

En donde $\hat{x}(k)$ es la variable de estado estimada y L es la matriz de ganancia de Kalman.

El filtro de Kalman estima el estado del proceso en un instante de tiempo y posteriormente obtiene una realimentación de las medidas. Por eso las ecuaciones del filtro de Kalman se pueden dividir en dos partes: actualización en el tiempo (conocida como predicción) y actualización en las medidas (conocida como corrección) [21]. En la fase de predicción, se realiza el cálculo del estado y de la covarianza del error actual $P(k)$ a partir de la covarianza del error en el instante anterior, es decir:

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) \quad (16)$$

$$P(k+1) = AP(k)A^T \quad (17)$$

En la fase de corrección, se actualiza la ganancia de Kalman, se corrige la estimación del estado calculado en la etapa de predicción y, finalmente, se actualiza la covarianza del error, o sea:

$$L(k+1) = P(k)C^T[CP^T + R]^{-1} \quad (18)$$

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + L(k)[y(k) - C\hat{x}(k)] \quad (19)$$

$$P(k+1) = [I - L(k)C]P(k) \quad (20)$$

La implementación del controlador utilizando el filtro de Kalman es similar a la utilizada con el observador tipo predictor diseñado, utilizando la técnica de asignación de polos [21], es decir:

$$D(z) = -\frac{U(z)}{Y(z)} = K[zI - A + BK + LC]^{-1}B \quad (21)$$

Como el sistema anterior no considera una entrada de referencia, se puede presentar error en estado estable; para evitar este problema, se utiliza un sistema de seguimiento con un integrador en el camino directo entre el comparador de error y la planta [21], [22], tal como se observa en la Figura 5.

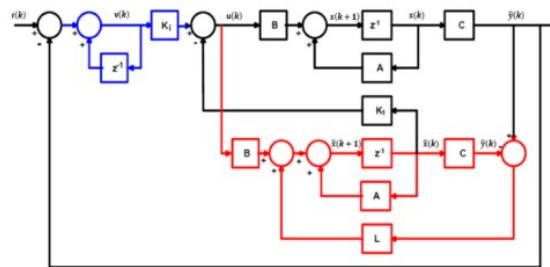


Figura 5. Sistema LQR con filtro de Kalman e integrador

La ley de control del sistema de la Figura 5 está dada por la ecuación (22), formada por el integrador, la matriz de ganancia de realimentación óptima y el estimador de estados del sistema (filtro de Kalman) [21], [23]

$$D(z) = \frac{[1 + K_1[zI - A + LC]^{-1}B]^{-1}[K_i z[R(z) - Y(z)] - (z-1)K_1[zI - A + LC]^{-1}LY(z)]}{z-1} \quad (22)$$

Para el cálculo de K_1 y K_i se utiliza la ecuación (23):

$$[K_1 \quad K_i] = [\hat{K} + [0 \quad I]] \begin{bmatrix} A - I_m & B \\ CA & CB \end{bmatrix}^{-1} \quad (23)$$

En donde \hat{K} es la matriz de ganancia del estimador óptimo LQR obtenida con las matrices ampliadas:

$$A_1 = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} \quad (24)$$

3. Resultados

3.1. Diseño del controlador STR por asignación de polos para el prototipo del generador CD

Utilizando como periodo de muestreo $T = 0,0335$ s, la función de transferencia discreta de la planta es:

$$G(z) = \frac{0,0289z^{-1} + 0,1673z^{-2} + 0,0249z^{-3}}{1 - 1,081z^{-1} + 0,274z^{-2}} \cdot z^{-1} \quad (25)$$

De la ecuación (24), se obtiene: $m = 3$, $d = 1$, por tanto para el controlador resulta: $v = 3$, $u = 4$ y el orden de la ecuación característica deseada es $l = 7$.

Se definen como parámetros de diseño para el sistema en lazo cerrado: factor de amortiguamiento de 0,8 y tiempo de establecimiento 20 % menor al correspondiente en lazo abierto. Así, los polos de lazo cerrado dominantes están ubicados en $z = 0,687 \pm j 0,18$. Se deben agregar cinco polos no dominantes para completar el orden de la ecuación característica. Si se ubican en $z = 0$, se obtiene la ecuación (26):

$$\Delta(z) = z^7 - 1,374z^6 + 0,504z^5 = 0 \quad (26)$$

Utilizando la ecuación (6) se estiman los parámetros del controlador:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,293 \\ -0,1657 \\ -0,4722 \\ -0,0691 \\ 2,7335 \\ -2,9053 \\ 0,7597 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

La función de transferencia del controlador es, según la ecuación (3):

$$D(z) = \frac{2,7335 - 2,9053z^{-1} + 0,7597z^{-2}}{1 - 0,293z^{-1} - 0,1657z^{-2} - 0,4722z^{-3} - 0,0691z^{-4}} \quad (28)$$

3.2. Diseño del controlador LQG para el prototipo del generador CD

La representación del sistema en el espacio de estados en su forma canónica observable está dada por:

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 1,081 & 1 & 0 & 0 \\ -0,297 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0,0289 \\ 0,1673 \\ 0,0249 \end{bmatrix} \quad y(k) = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (29)$$

Haciendo uso del software Matlab® se realiza el cálculo de la matriz de ganancia del observador L , ingresando como parámetros de entrada las matrices A y B del sistema y como ruidos para el proceso y para la medición $v = 0,02$ y $w = 0,008$ respectivamente. La matriz de ganancia del observador está dada por:

$$L = \begin{bmatrix} 0,2624 \\ -0,092 \\ 0,0258 \\ 0,0092 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Para el cálculo de la ganancia K del controlador LQR se utilizaron las matrices ampliadas A_1 y B_1 , dadas en la ecuación (24), debido a la inclusión del integrador. La matriz S inicial se tomó como una matriz identidad y las matrices Q y R se estimaron con el criterio de Bryson [16]:

$$Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5000 \end{bmatrix} \quad R = 1000 \quad (31)$$

El resultado obtenido, utilizando recursivamente las ecuaciones (10), (11) y (12), se da en la ecuación (31):

$$K - 1 = [1,0379 \quad 1,2611 \quad 1,1874 \quad 1,0924] \quad K_i = [0,2758] \quad (32)$$

4. Análisis de Resultados

4.1. Resultados obtenidos con el controlador STR

La Figura 6 muestra la respuesta del sistema de control STR simulada con el software Matlab®, ante escalones del 20 %, 30 % y 40 % respectivamente aplicados en la referencia. En la Figura 7 se presenta la respuesta del sistema real ante las mismas señales de entrada. Se observa coincidencia en las dos respuestas: máximo sobreimpulso menor del 10 %, buena velocidad de respuesta, error de estado estable igual a cero y la ley de control produce una salida bastante fuerte al inicio de la respuesta del sistema de control, llevando rápidamente el sistema a estabilidad en el punto de referencia establecido para cada caso.

La Figura 8 muestra la respuesta del sistema real ante una perturbación: se añade una carga al generador en $t=14s$ y se suspende en $t=20s$, se observa que el controlador STR responde de manera eficiente ante el cambio de carga, presentando una respuesta rápida en presencia de la misma y retornando el sistema al punto de referencia, tanto al conectar la carga como al desconectarla.

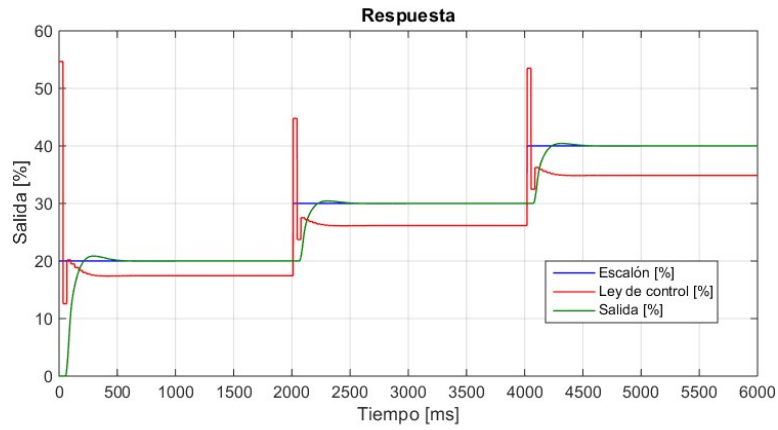


Figura 6. Simulación del controlador STR

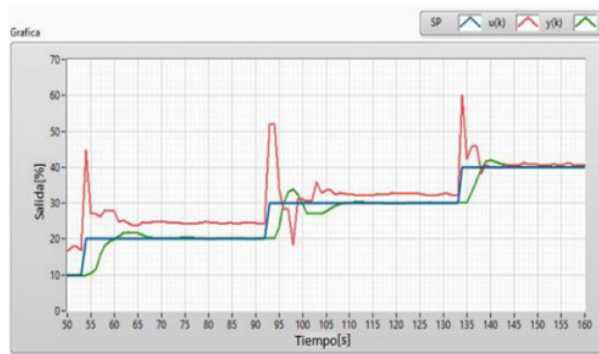


Figura 7. Control STR con el prototipo del generador CD

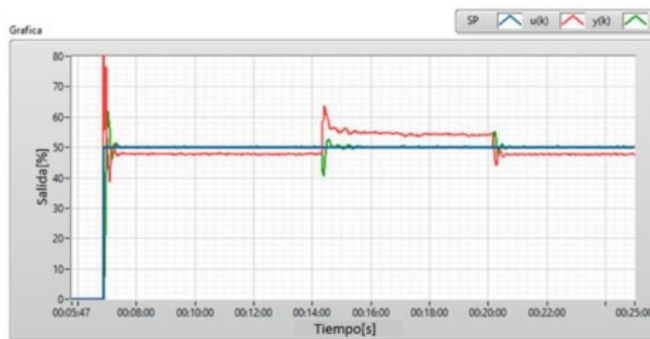


Figura 8. Respuesta del control STR ante una carga

4.2. Resultados obtenidos del controlador LQG

La Figura 9 muestra la respuesta del sistema con el controlador LQG, simulada con el software Matlab®, para entradas en forma de escalón del 20 %, 30 % y 40 %, y en la Figura 10 se aprecia la respuesta del sistema real ante las mismas señales de entrada. En los dos casos el sistema presenta buena velocidad de respuesta, error de estado estable igual a cero, sobreimpulso no significativo, y la ley de control no es tan agresiva como la generada por el STR en las mismas condiciones.

Finalmente, en la Figura 11 se ve la respuesta del sistema ante una carga aplicada al generador, igual que la utilizada para el STR; se observa que el controlador LQG responde rápidamente ante

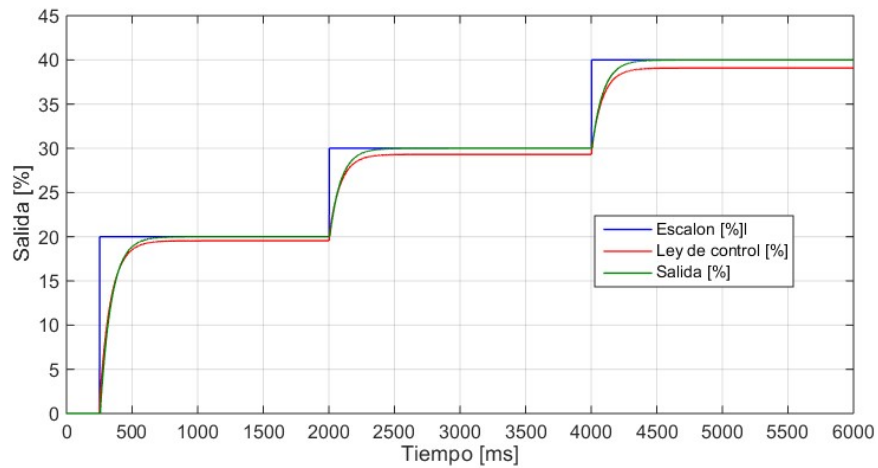


Figura 9. Simulación del controlador LQG

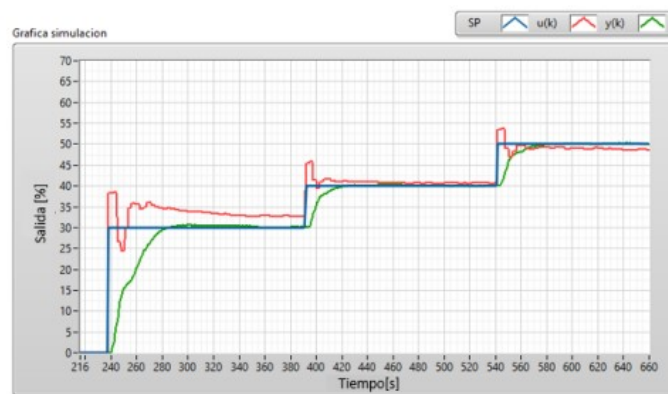


Figura 10. Control LQG del prototipo del generador CD

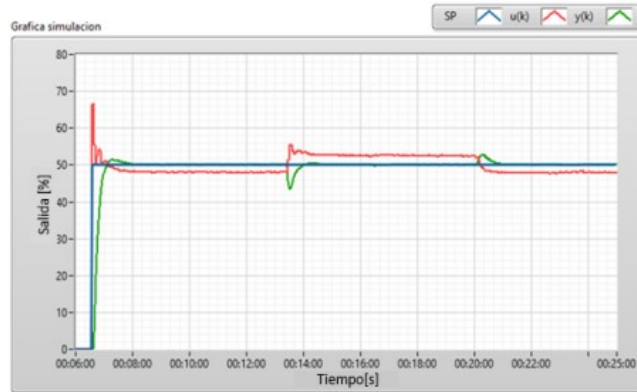


Figura 11. Respuesta del control LQG ante una carga

la presencia de la carga y el sistema retorna al punto de consigna tanto al aplicar la carga como al desconectarla.

4.3. Comparación del desempeño de las dos estrategias de control para el prototipo del generador CD

Para comparar las dos estrategias de control, se utilizaron métricas de respuesta temporal y de la integral evaluadas bajo las mismas condiciones de señal de entrada y de carga aplicadas al sistema real. Para la respuesta temporal se utilizaron: el máximo sobreimpulso (M_p), el tiempo de establecimiento (t_s) y el error de estado estable (e_{ee}). En las métricas de la integral se utilizaron, entre otras, la integral del valor absoluto del error (IAE), la integral del valor del cuadrado del error (ICE) y el trabajo sobre la variable manipulada (TVM). Se considera una zona de operación entre el 40 % y 70 % con incrementos del 10 % en la referencia, en la Figura 12a se observa la respuesta del sistema de control STR y en la Figura 12b se muestra la del sistema de control LQG ante el mismo estímulo.

En la Tabla I se presentan los resultados obtenidos con cada una de las métricas para el controlador LQG y para el STR respectivamente. Los resultados muestran que las diferencias en el desempeño de las dos estrategias de control no presentan diferencias muy significativas, inclinándose a favor del controlador LQG, en algunos aspectos como la no presencia de sobreimpulso y menores valores en los criterios de la integral del error y a favor del STR en cuanto a menor tiempo de establecimiento. Los resultados de las pruebas indican que para incrementos en el set-point del 10 %, el controlador LQG presentó, en todos los casos, menor sobreimpulso que el STR. Sin embargo, el tiempo de establecimiento con el controlador LQG fue mayor al presentado por el controlador STR. En los experimentos realizados, los dos controladores presentan error de estado estable igual a cero. Analizando los resultados de las métricas de la integral del error y el TVM, se deduce que el desempeño del controlador LQG, en términos generales, fue mejor que el presentado por el controlador STR.

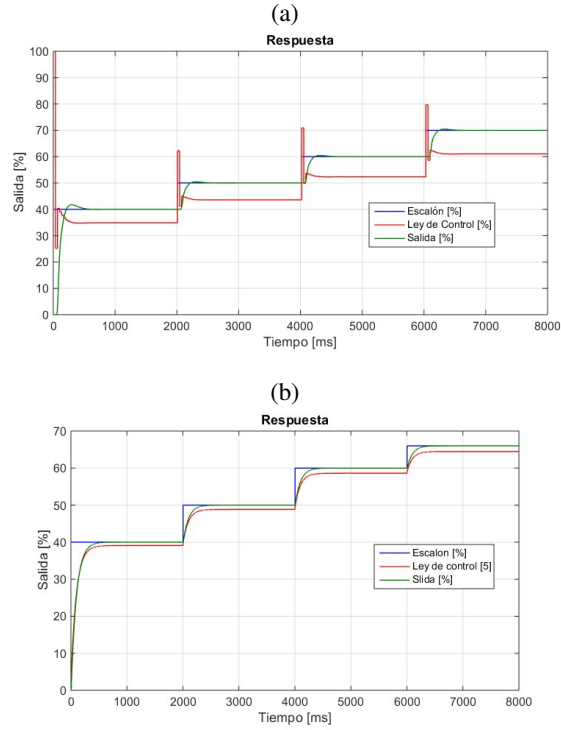


Figura 12. a) Respuesta con el control STR. b) Respuesta con el controlador LQG

Tabla I. Desempeño del Controlador LQG y del controlador STR

Métrica	CONTROLADOR LQG				CONTROLADOR STR			
	40 %	50 %	60 %	70 %	40 %	50 %	60 %	70 %
Mp[%]	0,00	0,00	0,00	0,00	4,5	1,0	2,0	2,0
e_{ee} [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
t_s [s]	0,6	0,5	0,5	0,4	0,57	0,40	0,35	0,35
TVM	10.609	10.270	10.690	10.601	10.910	10.911	10.987	10.945
ECM	162,81	7,39	7,64	7,72	181,10	12,06	10,689	16,578
IAE	310,39	63,31	63,37	65,87	376,86	106,90	84,06	122,38
IAET	15,85	3,74	3,44	3,93	33,31	11,98	6,18	10,73
ICE	8.390	369,72	382,19	386,09	9.058,9	402,96	434,46	528,93
ICET	243,09	8,11	8,21	8,74	324,7	19,31	12,02	21,57

Fuente: elaboración propia

5. Conclusiones

Se realizó el diseño de dos estrategias de control para el voltaje generado por una planta prototipo formada por la combinación de dos motores de 24 V, uno trabajando como motor propiamente dicho y el otro como generador. Para el diseño de los controladores la planta se aproximó a un sistema de segundo orden con retardo. Al realizar las pruebas sobre el sistema real se observó que las dos estrategias de control mostraron buen desempeño ante cambios en la señal de referencia y en presencia de perturbaciones. El tiempo de establecimiento del sistema con el controlador STR fue menor que el del sistema con el LQG pero, como resultado, el controlador STR presentó mayor sobreimpulso y una ley de control más agresiva que la del sistema con el LQG, haciéndose evidente la relación entre el esfuerzo de control y los parámetros de desempeño de sobreimpulso y el tiempo de establecimiento. También se observó que las variaciones en la carga no afectaron la estabilidad del sistema y los dos controladores compensaron los cambios en la misma, lo cual demuestra que las dos estrategias son robustas ante la presencia de perturbaciones, notándose, en general, un mejor desempeño del controlador LQG. Finalmente, y a diferencia de otros trabajos en los cuales se analiza el desempeño de controladores mediante métricas de la integral y de la respuesta temporal en un solo punto de trabajo, en este trabajo se proporcionó un criterio de evaluación basado en la respuesta en diferentes zonas de trabajo del proceso, evaluación útil en sistemas no lineales con multiplicidad de estados.

A futuro, el trabajo motiva a utilizar en el prototipo otros algoritmos de control, incluyendo el uso de algoritmos genéticos, redes neuronales y control Fuzzy con miras a contribuir desde lo académico a soluciones que puedan ser aplicables en ambientes reales de control de procesos.

Referencias

- [1] R. Szabolcsi, "Robust LQG Controller Design for the Small Unmanned Aerial Vehicle", *Review of the Air Force Academy*, vol. XVI, no. 1, 31-36, 2018. <https://doi.org/10.19062/1842-9238.2018.16.1.5> ↑26
- [2] H. González y H. González, "Diseño de un sistema de control avanzado para regular la velocidad de una turbina de vapor acoplada a un generador CD", *Iteckne*, vol. 15, no. 1, 2018. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v15i1.1964> ↑26
- [3] R. da Silva, A. Murilo, and E. Teixeira, "Controlador LQG aplicado a um sistema de direção elétrica". *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia*, 2 (31), 164-181, 2017. ↑26
- [4] C. González, *Comparación de un controlador LQR vs un controlador PID implementados en un helicóptero de dos grados de libertad pivotado* (Trabajo de grado), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Ingeniería en Control, Bogotá D.C., 2016. <http://hdl.handle.net/11349/4020> ↑26
- [5] P. Patel, "Modeling and Optimal Control Algorithm Design for HVAC Systems in Energy Efficient Buildings", *International Research Journal of Engineering Science, Technology and Innovation (IRJESTI)*, vol. 2, no. 2, pp. 29-39, 2013. ↑26
- [6] J.-K. Ji, D.-C. Lee, and S.-K. Sul, *LQG Based Speed Controller for Torsional Vibration Suppression in 2-Mass Motor Drive System*. Conferencia: Proceedings of IECON, International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1993 (2002). doi: <https://doi.org/10.1109/IECON.1993.339166> ↑27
- [7] J. M. Ahmed, "Optimal LQG Controller Based on Genetic Algorithm Technique for Speed Control of CD Motor", *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, vol. 7, no. 1, 2017. ↑27
- [8] L. Jung, *System Identification: Theory for the User*, Prentice Hall, 1999. ↑28
- [9] J.C. Gómez, "Toolbox didáctico para el diseño y análisis de sistemas de control lineal", *Educación en Ingeniería*, vol. 4, no. 8, pp. 155-169, 2009. ↑28

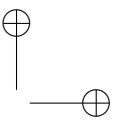
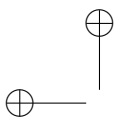
- [10] V. Alfaro, "Identificación de procesos sobrearmortiguados utilizando técnicas de lazo abierto", *Ingeniería* (Universidad de Costa Rica), vol. 11, no. 1-2, pp. 11-15, 2001. ↑28
- [11] F. De la Cruz y O. Camacho, "Controlador de modos deslizantes basado en Predicador de Smith y modelo de segundo orden para procesos con elevado retardo", *Revista Politécnica*, vol. 35, no. 2, 2015. ↑29
- [12] L. E. García y M. Arroyave, "Controlador difuso y controlador por asignación de polos para un levitador neumático", *Revista Politécnica*, vol. 11, no. 21, pp. 107-116, 2015. ↑29
- [13] G. Montoro, *Contribución al estudio y desarrollo de técnicas de control aplicadas a la linealización de sistemas* (Tesis doctoral), Departamento de Teoría del Señales y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Catalunya, 1996. <http://hdl.handle.net/2117/94219> ↑30
- [14] M. Outanoute, A. Lachhab, A. Ed-dahhak, M. Guerbaoui, A. Selmani, and B. Bouchikhi, "Synthesis of an Optimal Dynamic Regulator Based on Linear Quadratic Gaussian (LQG) for the Control of the Relative Humidity under Experimental Greenhouse", *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 6, no. 5, pp. 2262-2273, 2016. ↑30
- [15] K. Ogata, *Sistemas de control en tiempo discreto*, México, Prentice Hall Hispanoamericana, 1996. ↑30
- [16] G. Beauchamp y R. Batista, *Aplicación de técnicas de control óptimo a una plataforma estacionaria cuatrimotor*. *RIELAC*, vol. XXXVII 3, p. 34-49, 2016. ↑30, 34
- [17] D. K. Solórzano, *Diseño e implementación de un controlador óptimo LQG, para un sistema de péndulo invertido aplicado en un equipo Lego Mindstorms* (Tesis de pregrado), Universidad Politécnica Salesiana Ingeniería Electrónica, Quito, 2018. ↑30
- [18] F. Bote, *Modelado y control del péndulo invertido sobre carro mediante sistemas híbridos* (Tesis de maestría), Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingenieros, 2016. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11452/fichero/PFC.pdf> ↑30
- [19] V. A. Ortiz, M. A. Nieto y E. A. Quintero, "Metodología para la estimación de parámetros en tiempo real mediante filtros de Kalman y mínimos cuadrados", *Iteckne*, vol. 10, no. 1, pp. 37-44, 2013. ↑31
- [20] V. Merino, *Implementación genérica del filtro de Kalman UKF para modelos desarrollados con Modelica* (Tesis de grado), Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, 2017. ↑31
- [21] L. E. García, *Control digital: teoría y práctica*, 3ª ed., Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2013. ↑31, 32
- [22] P. A. Muñoz, V. E. Ardila y E. Giraldo, "Identificación por filtro de Kalman y control adaptativo por realimentación de estados de un puente de grúa", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, no. 26, 2015. ↑32
- [23] E. Giraldo y D. Albarracín, "Identificación y control multivariable en espacio de estados de un generador eólico de imanes permanentes", *Épsilon*, no. 22, pp. 169-188, 2014. ↑32

Luis Eduardo García Jaimes

Ingeniero en Instrumentación y Control, Politécnico Colombiano JIC, Especialista en Automatización Industrial, Universidad del Valle, MSc en Educación, Universidad de Antioquia. Profesor de Sistemas de control avanzado en el Politécnico Colombiano JIC de Medellín y de sistemas de Control Digital en la Institución Universitaria de Envigado. Miembro del grupo de Investigación ICARO del Politécnico Colombiano JIC.
Correo electrónico: legarcia47@gmail.com

David Piedrahíta Flórez

Ingeniero en Instrumentación y Control, Politécnico Colombiano JIC (2018).
Correo electrónico: david_piedrahita91131@elpoli.edu.co



Research

Educational Environment for Primary School Using a Commercial Robotic System

*Entorno pedagógico para la enseñanza en básica primaria
mediante el uso de sistema robótico comercial*

Glen Camilo Ortega¹, **Andrés Felipe Téllez**¹, **Jose Guillermo
Guarnizo**¹, **Edgar Camilo Camacho**¹

¹Grupo de Estudio y Desarrollo en Robótica GED, Universidad Santo Tomás.
correspondence email: jose.guarnizo@usantotomas.edu.co.org

Recibido: 30/07/2020. Modificado: 30/09/2020. Aceptado: 29/10/2020.

Abstract

Context: In this paper, the design of a robotic system applied to learning in primary school is presented. This system is controlled through a mobile application, where two teams competing against each other answer questions about a subject. The robot moves along a racetrack whenever a team answers correctly. The system is designed for easy operation without advanced knowledge in robotics or informatics.

Method: First, the results from Colombia's Pisa tests were consulted, finding that primary school shows a significant weakness in mathematics. Afterwards, a robotic educational platform was designed using a LEGO MINDSTORM robot and a mobile phone app. The education environment was validated by means of perception surveys at the end of an academic activity with 40 students between third and fifth grade.

Results: The surveys reported an overall interest and satisfaction from the students with the academic activity and the proposed system. The children were very disciplined in the class with the robot. The activity was supported by the mathematics teacher, who believes that the class yielded positive results, thus contributing to the students' academic development.

Conclusions: The use of robotic platforms contributes to the learning process of children. This is because these activities are appealing and interactive. These kinds of systems are designed to develop teamwork. One important characteristic of these environments must be easy usage since they are conducted by teachers without knowledge in robotics or informatics. These platforms must be more accessible and low-cost, but their design must still be attractive.

Keywords: Robotics, education, learning, mathematics.

Acknowledgements: This work was funded by "Decimocuarta convocatoria interna para el formento de la investigación y la innovación FODEIN 2020" at Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, entitled "Optimización de trayectorias mediante algoritmos bio-inspirados aplicado a robots móviles con percepción local" (project code 2036004).

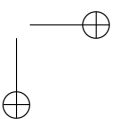
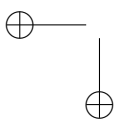
Language: Spanish

Open access



Cite this paper as: G. Ortega, A. Téllez, J. Guarnizo y E. Camacho: Entorno pedagógico para la enseñanza en básica primaria mediante el uso de sistema robótico comercial. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 1, pp. 41-61 (2021).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
<https://doi.org/10.14483/23448393.16721>



Resumen

Contexto: En este artículo se presenta el diseño de un sistema robótico aplicado para la enseñanza en básica primaria, dirigido a la población infantil. El sistema robótico es controlado mediante una aplicación en un teléfono celular, a partir del cual dos equipos de niños compiten moviendo un robot en una pista cuando responden correctamente una pregunta. El sistema está diseñado para ser operado por personas sin conocimientos avanzados en informática o robótica.

Método: Inicialmente se realizó una revisión de los resultados de las pruebas Pisa para Colombia, donde se evidenció que en educación básica primaria existen fuertes deficiencias en matemáticas. Posteriormente se procede al diseño del sistema utilizando la plataforma robótica Lego Mindstorm y una aplicación para teléfono celular. El sistema es validado en una actividad con 40 niños de grados tercero y quinto, validando la actividad por medio de encuestas.

Resultados: Las encuestas reflejaron una satisfacción general de los estudiantes al realizar la actividad, mostrando mucho interés, así como concentración. Se evidenció disciplina de los niños en la actividad. La actividad fue acompañada por el docente del espacio académico, quien consideró que el ejercicio realizado fue positivo y contribuye al desarrollo académico de los estudiantes.

Conclusiones: El uso de plataformas robóticas contribuye a los procesos de aprendizaje en la población infantil al ser atractivas, interactivas y fortalecer el trabajo en equipo. Este tipo de plataformas deben ser de fácil uso, ya que las actividades serían acompañadas por docentes de distintas formaciones. Se debe buscar que las plataformas sean accesibles y de bajo costo, pero con un diseño llamativo para la población a la que va dirigida.

Palabras clave: Educación, enseñanza, matemáticas, robótica.

Agradecimientos: Este proyecto ha sido financiado por la “Decimocuarta convocatoria interna para el fomento de la investigación y la innovación FODEIN 2020” de la Universidad Santo Tomás, Bogotá D.C., Colombia, titulado “Optimización de trayectorias mediante algoritmos bio-inspirados aplicado a robots móviles con percepción local”, código de proyecto: 2036004.

Idioma: Español

1. Introducción

El uso de herramientas tecnológicas aplicadas a la educación ha tenido gran acogida en los últimos años, principalmente por el avance que presenta el sector tecnológico. Esto ha permitido que las generaciones más jóvenes presenten un mayor interés hacia la robótica, derivando en procesos de aprendizaje y desarrollo de competencias adaptadas a los nuevos tiempos. El uso de herramientas basadas en robótica y las TIC aplicadas a procesos educativos dirigidos a la población infantil, permite un mejor acercamiento de la población más joven a las nuevas tecnologías, además de que proporciona herramientas a los docentes para los procesos de enseñanza [1].

Colombia presenta serios retos en cuanto a la calidad de la educación, incluyendo la enseñanza básica primaria en pruebas relacionadas con conceptos matemáticos. Una de las causas de estas falencias se debe a la poca o nula implementación de nuevas tecnologías en las mallas curriculares de los espacios académicos que se imparten en estos cursos [2]. Se observa que metodologías de aprendizaje son anticuadas y no se adaptan a las necesidades vigentes [3]. También se evidencia la necesidad de proponer estrategias pedagógicas con el fin de facilitar un mejor entendimiento entre estudiantes y profesores.

El uso de tecnologías en los procesos de aprendizaje busca desarrollar en los niños habilidades para afrontar y resolver problemas, permitiendo una mejor aceptación en la adquisición de nuevas competencias en el uso de tecnologías vanguardistas, desarrollando también un mayor interés en temas como como la robótica. Esto le ofrece al docente nuevas herramientas en los procesos de enseñanza [4]. En [5] se detallan distintas razones por las cuales la robótica educativa puede ser utilizada para fomentar el aprendizaje en niños menores de ocho años. En [6] se evidencia cómo el involucrar robots en procesos de aprendizaje en población infantil y de adolescentes incrementa el interés tanto en los estudiantes para el aprendizaje en programación de computadores y algoritmos, como también en docentes y pedagogos de educación básica primaria en el uso de herramientas tecnológicas aplicadas a sus procesos de enseñanza.

Se define como “robótica educativa” la disciplina que permite apropiación cognitiva, en la cual se desarrollan robots para que estudiantes se integren con la tecnología fácilmente, mejorando los procesos de aprendizaje [7]. Algunos trabajos de robótica educativa tratan sobre la implementación de robots móviles construidos con piezas del kit comercial Lego Mindtorms, como apoyo en la educación preescolar y educación primaria [8]. Otros proyectos se enfocan en el diseño de su propia plataforma tecnológica, como por ejemplo en [9], donde se construyó un robot móvil didáctico para el trabajo con niños de básica primaria para la enseñanza de conceptos elementales de geometría, mediante el uso de comandos de voz. El uso de la robótica para la enseñanza de principios de física como punto de equilibrio y demás conceptos de ingeniería realizado en Colombia es detallado en [10]. En [11] se presenta el diseño de una herramienta de *software* con propósitos educativos para la configuración de robots Lego Mindstorm EV3 y VEX, para la enseñanza de cursos de robótica a nivel técnico. En [12] se presenta una revisión sobre distintas redes de conocimiento para el intercambio de experiencias en robótica educativa en el contexto latinoamericano.

En un trabajo realizado en la Universidad de Salamanca España se documentaron las distintas ventajas que se encontraron al trabajar con kits robóticos implementados en áreas de pedagogía como apoyo a la enseñanza en temas en el área de matemáticas, física o electrónica, observando que este tipo de tecnología genera ambientes de aprendizaje que le facilitan al estudiante resolver problemas en situaciones más cercanas al mundo real [13]. En el año 2014, en la Universidad Pedagógica Nacional de Colombia, fueron presentadas plataformas de programación de uso robots Lego Mindtorms NXT V1.0 y V2.0 con el propósito de realizar actividades lúdicas con el uso de la robótica, buscando motivar a estudiantes de primaria y a docentes del uso de tecnologías para estrategias de educación con robótica [14]. En el año 2015, en la Universidad Pedagógica Nacional en Bogotá, una línea de robótica escolar fue implementada, validada con estudiantes de últimos años del Colegio Técnico Jaime Pardo Leal; se usó la plataforma Lego Mindstorm que contiene sensores, actuadores, lazos de control realimentados y piezas constructivas con el fin de introducir lenguajes de programación como PHP, HTML y CSS3 [15]. En [16] se utiliza la robótica para apoyar la enseñanza de las matemáticas en la población infantil.

En la Universidad Politécnica delle Marche en Italia, fue realizado un taller de aprendizaje en ciencia y tecnología dirigidos a menores con edades ubicadas entre los seis y los quince años con el fin de enseñar conocimientos básicos de diseño, construcción y programación trabajando con Lego Mindstorms NXT, corroborando que esta metodología innovadora puede ser aplicada en diferentes actividades académicas [17]. En Suecia, en un proyecto de robótica educativa orientada a la po-

blación infantil, fue implementado un tutor robótico en una escuela de primaria durante cerca de tres meses. El robot fue diseñado para dar clases a los estudiantes de geografía y ciencias sociales en básica primaria, desarrollando actividades para familiarizar a los estudiantes con la lectura de mapas. De este estudio se concluye que los robots permiten mejorar la interacción con niños, lo que estimula un fácil aprendizaje [18]. En [19] se realiza un estudio sobre los efectos del aprendizaje en niños al usar la plataforma robótica Bee-Bot para la enseñanza de pensamiento computacional, encontrando estadísticamente un aumento significativo en las habilidades computacionales entre los participantes de las pruebas.

En [20] se realiza una revisión del estado del arte sobre el uso de tecnologías basadas en robótica social aplicada para el apoyo en la educación secundaria y preuniversitaria, enfocada en la enseñanza de matemáticas y ciencia, señalando que potencian el acceso y la inclusión de comunidades multiculturales en el aula de clase. Robots humanoides han sido utilizados en labores pedagógicas con niños que sufren de diabetes, con el fin de apoyar procesos de aprendizaje en el cuidado de dicha enfermedad, mostrando una mejora en el tratamiento de este mal en la población infantil [21]. Con una aplicación apoyada en robots móviles Lego Mindstorms, se encontró que se puede mejorar el proceso de aprendizaje de las matemáticas en niños con distintos niveles de autismo [22]. Un trabajo que también involucra robots para la enseñanza dirigido a niños con autismo es presentado en [23], donde el instructor dirige las clases mediante juegos sociales, actividades basadas en historias, así como actividades de canto y baile, los resultados sugieren que la interacción con el robot atraía la atención de los niños sobre los temas impartidos.

Estos trabajos anteriormente relatados permiten apreciar un impacto favorable cuando se involucran tecnologías robóticas en procesos de aprendizaje. Teniendo esto en cuenta, en el siguiente artículo se propone el diseño de un entorno pedagógico mediante el uso de un kit robótico comercial Lego Mindstorm, el cual permita la enseñanza de contenidos matemáticos de básica primaria, dirigido a una población infantil. Para complementar el *hardware* se procede al diseño de la interfaz del usuario con la máquina, la cual será un aplicativo en un dispositivo móvil. Finalmente, se desarrolla su validación en un aula escolar, orientada a un espacio académico de matemáticas con niños entre los grados tercero y quinto de educación básica primaria, con el fin de medir la aceptación por parte de la comunidad infantil escolarizada y los docentes. Los resultados sugieren que el uso de tecnologías en los procesos de enseñanza preescolar genera un mayor interés por parte de los estudiantes en edad infantil, involucrándolos desde temprana edad en el uso de tecnologías de la información y las telecomunicaciones, y presentando otros escenarios interactivos diferentes a sus procesos de aprendizaje.

2. Diseño entorno pedagógico

Con el fin de diseñar el entorno pedagógico basado en un kit de robótica comercial, inicialmente se plantea la búsqueda de un problema en la enseñanza de un tema enfocado a la educación básica primaria; posteriormente, se presenta una metodología para la implementación en un el kit de robótica comercial seleccionado. Procurando complementar el entorno pedagógico, se diseña una guía que le permita al docente desarrollar las actividades académicas sin necesitar conocimientos avanzados en robótica.

2.1. Selección de la temática de educación básica primaria

Con el propósito de seleccionar una problemática académica en la cual se deba priorizar, se procede a consultar dos índices referentes en evaluación educativa, uno global y el otro local. Para el primer caso, se utiliza el registro otorgado por la organización para la cooperación y el desarrollo económico (OCDE), en el cual participan alrededor de 70 países [24]. Esta evaluación es aplicada cada tres años a los jóvenes mayores de quince años.

Como se puede apreciar en la Figura 1, pese a que hay una leve mejora del año 2012 al 2015 en ciencias, resultado de un esfuerzo a nivel nacional por lograr alcanzar un nivel adecuado, al comparar estos resultados en el contexto internacional, Colombia sigue relegada con una diferencia del 26 % con respecto a los demás países de la OCDE. Al revisar la Figura 2, en comprensión de lectura, aunque se observa una notable mejora de ocho puntos porcentuales en los niveles 0, 1A, 1B, sigue existiendo un rezago frente a la OCDE. Siendo esta la mejor competencia a nivel nacional se requiere un mayor esfuerzo para lograr ser competitivos frente a los países miembros de la organización. Finalmente, como se observa en la Figura 3, el desempeño matemático es donde se presenta la brecha más grande, pues el 66 % de los estudiantes colombianos no supera el objetivo mínimo; también se observa cómo en las demás competencias evaluadas Colombia se encuentra por debajo de la media de los países miembros de la organización.

Revisando un caso puntual a nivel de Bogotá D.C., como se presenta en la Figura 4, se observa que en los resultados de las pruebas Pisa realizadas en el año 2017 el 43 % de los estudiantes de grado tercero no alcanza un nivel satisfactorio en matemáticas, evidenciando un problema en esta área. El hecho anterior confirmaría la deficiencia de los estudiantes de educación básica primaria en matemáticas tanto a nivel Colombia como en Bogotá D.C., ya que como se observa en la Figura 5, el 62 % de los estudiantes no cumplen un nivel satisfactorio en matemáticas, llegando al 31 % el nivel deficiente. Esto permite concluir que el espacio de matemáticas presenta importantes deficiencias en cuanto al rendimiento de los estudiantes de educación básica, por lo que se elige este espacio curricular para la aplicación del entorno pedagógico.

2.2. Implementación de robot comercial y aplicación en teléfono móvil aplicado a la enseñanza en básica primaria

Para el uso del robot como entorno pedagógico en la enseñanza de las matemáticas se propuso el siguiente procedimiento: se dispone de una pista negra con una línea blanca donde un robot móvil debe transitarla hasta llegar a una meta, deteniéndose en diferentes marcadores; adicionalmente, se tienen dos equipos y una aplicación en un teléfono móvil. En una primera actividad, se debe seleccionar cuál de los dos equipos empieza; cuando el robot llega a un marcador realiza una pregunta sobre matemáticas, se le pregunta al primer equipo, si el equipo responde correctamente se le asigna un punto y el robot continúa al siguiente marcador. En caso contrario, se sede el turno al otro equipo. No obstante, ambos equipos tendrán el mismo número de turnos, de tal manera que gana el equipo que más puntos realice en sus turnos.

Para este trabajo se utilizó la plataforma Lego Mindstorm utilizando el lenguaje de programación de alto nivel NXT [25]. Con el fin de hacer el robot atractivo para una población infantil, se ensam-

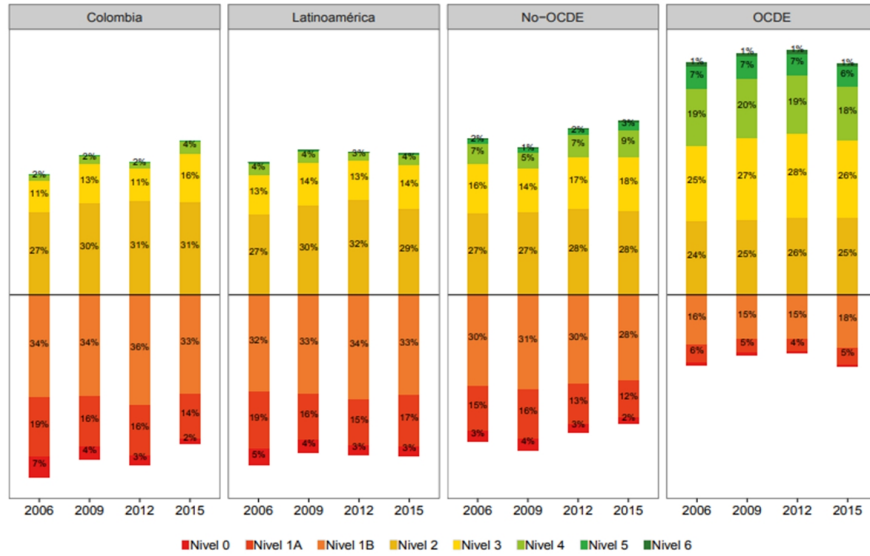


Figura 1. Nivel de desempeño en ciencias de acuerdo con las pruebas Pisa [24].

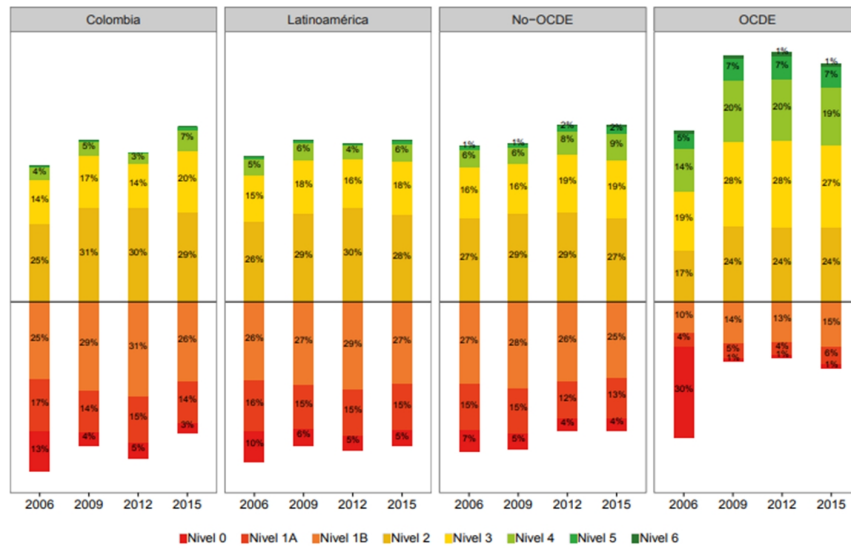


Figura 2. Nivel de desempeño en lectura de acuerdo con las pruebas Pisa [24].



Figura 3. Nivel de desempeño en matemáticas de acuerdo con las pruebas Pisa [24].

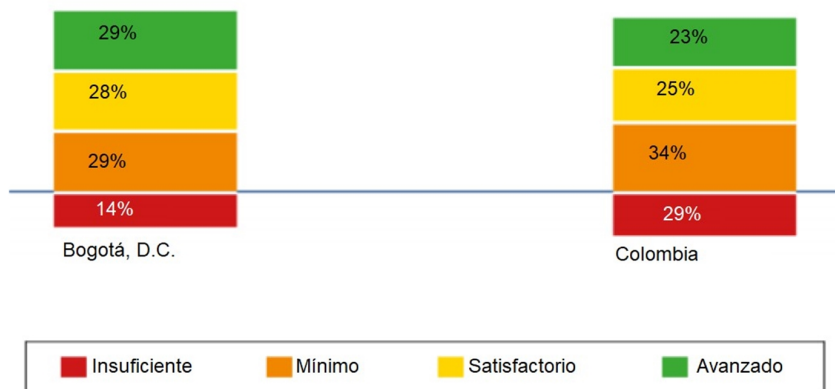


Figura 4. Resultados pruebas saber 2017 grado tercero en área de matemáticas [24].

bla el robot con el modelo de un perro, tal como se presenta en la Figura 6. La intención del perro es ser un robot seguidor de línea, por lo que se utiliza un sensor de luz Lego Mindstorm en la parte inferior del perro. Este sensor detecta si está sobre la línea a partir de la intensidad de luz recibida por el sensor, lo que le permite saber al robot si se encuentra en el borde izquierdo o en el borde derecho, así el robot logra realizar el comportamiento necesario, tal como se presenta en la Figura 7.

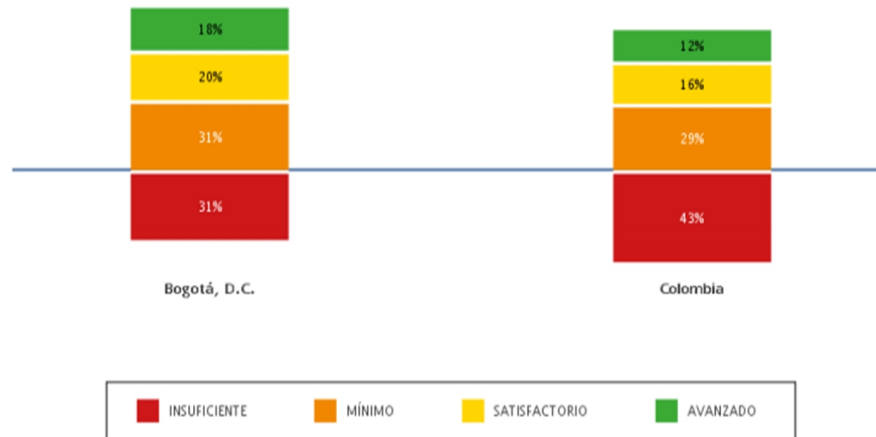


Figura 5. Resultados pruebas saber 2017 grado quinto en área de matemáticas [24].

Además de seguir la línea, el robot deberá detenerse en distintos marcadores para realizar la actividad con los estudiantes. En esta actividad el robot utiliza un led blanco y un sensor sensible a la luz, el cual se calibra para que identifique el color rojo, de acuerdo con lo que se explica en [26]. Para el desarrollo de la programación del robot se trabajaron tareas de paralelismo y subrutinas. En la Figura 8 se presenta el diagrama de bloques de inicialización del sistema y activación de los sensores. En el caso de que al revisar la conexión Bluetooth no encuentre conexión con la aplicación del dispositivo móvil se generará una señal de error.

En el desarrollo de la aplicación móvil se debe buscar que esta sea dinámica, llamativa y de muy fácil comprensión tanto para los estudiantes como para el docente, por lo cual se seleccionó un entorno de desarrollo de *software* llamado App Inventor, el cual funciona bajo el sistema operativo Android [27]. La pantalla principal de la aplicación se presenta en la Figura 9, este sistema permite la posibilidad de elegir uno de los dos equipos con el que se va a participar, presenta la pregunta que se le realiza al estudiante, junto al marcador del juego. Para este proceso, se generan dos campos de texto donde se deben introducir los nombres de los equipos; posterior a esto se pide una validación del nombre asignado y se inicia el juego. La aplicación se conecta al robot Lego mediante conexión Bluetooth, inicializando las diferentes variables a utilizar como lo son el control de los turnos por equipo, el registro de las respuestas correctas, marcador, temporizadores, entre otras.

Posterior a este proceso, se ejecuta la asignación de gráficos en la pantalla secundaria que es la encargada de presentar la pregunta a realizar, la cual consta de operaciones aritméticas básicas a partir de números aleatorios, la aplicación le presenta al estudiante la respuesta real y otras falsas aleatorias, allí el estudiante debe seleccionar la que considera correcta. Se diseña igualmente un selector de puntos encargado de almacenar los puntos ganados por cada equipo, así como notificar el cambio de turno mediante ayudas visuales.

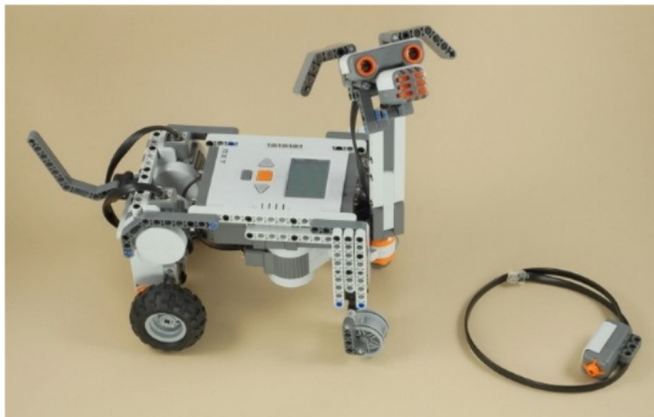


Figura 6. Modelo robótico LEGO MINDSTORM.

Cada vez que ante una pregunta el estudiante seleccione la respuesta que considera correcta, se compara la respuesta real con la seleccionada por el estudiante; en caso de que la selección haya sido correcta un botón presentado en la pantalla cambiará a color verde y actualizará el marcador. Posteriormente se le envía una señal al robot para que se mueva hasta que detecte la siguiente estación, internamente en la aplicación se activa un temporizador de diez segundos, tiempo aproximado en que el robot se mueve a la siguiente estación.

En el caso de que el estudiante no haya seleccionado la respuesta correcta, el botón de fondo asignado se tornará rojo indicando que la respuesta es incorrecta, lo que el proceso de cambio de turno y no acumula puntos en el marcador. Finalmente, siempre que se inicialice cualquier proceso se activa un temporizador de diez segundos que se desactivará cuando sea pulsado algún botón, esto se hace con el propósito de generar cambio de turno automático en caso tal de que nadie del equipo responda. Un ejemplo de caso de la segunda pantalla es presentado en la Figura 10, incluyendo también figuras alusivas al Lego Mindstorm para hacerlo más llamativo a una población infantil.

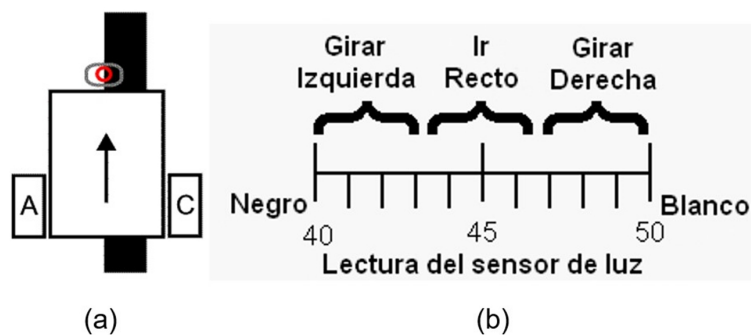


Figura 7. (a) Modelo seguidor de línea. (b) Lectura de intensidad de luz reflejada.

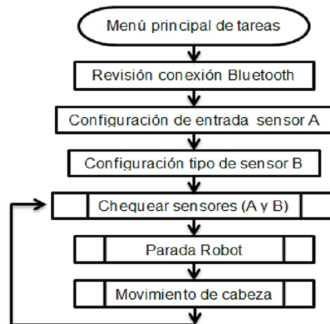


Figura 8. Diagrama de bloques del robot y activación de sensores.

2.3. Diseño de la guía para la aplicación y el seguimiento del sistema pedagógico

Con propósito de diseñar una guía que pueda ser utilizada por personas que tengan conocimientos muy básicos en el uso de teléfonos celulares inteligentes y ninguno en robótica, se debe minimizar los pasos a seguir para el uso del sistema de enseñanza. Para este propósito se elaboró un folleto, tal y como se presenta en la Figura 11, el cual se le entrega al docente para el desarrollo de la actividad. En esta guía se explica paso a paso el proceso de encendido del robot, la conexión vía Bluetooth con el teléfono celular y el procedimiento con los estudiantes. La guía también sugiere el proceso de seguimiento con los estudiantes en caso tal de que no respondan satisfactoriamente la pregunta asignada.



Figura 9. Pantalla principal de la aplicación.



Figura 10. Segunda pantalla aplicación en el teléfono celular.

Con la intención de validar el grado de satisfacción de la herramienta pedagógica, se diseña una encuesta dirigida a los estudiantes. Teniendo en cuenta lo anterior, la encuesta debe ser llamativa para un público infantil, en las respuestas de las preguntas se agregan cinco íconos que expresarían sentimientos entre felicidad (máxima calificación) y tristeza (calificación completamente insatisfactoria), tal como se puede observar en la Figura 12. En la encuesta que se realiza a los estudiantes, se incluyen las siguientes preguntas:

- “¿Cómo calificas la actividad?”. Esta pregunta pretende determinar el gusto de los estudiantes frente a la actividad.
- “¿Cómo calificas la aplicación en el celular?”. Esta pregunta pretende determinar el gusto por la inclusión del dispositivo móvil en la actividad.
- “¿Cómo consideras la presencia del robot en la actividad?”. Esta pregunta busca la importancia que los estudiantes le dan al uso del robot en la actividad.
- “¿Sientes que aprendiste con Tony?”. Entendiendo que el nombre del robot es Tony, la pregunta busca evaluar el grado de aprendizaje que los estudiantes consideran que tuvieron con el robot.
- “¿Cómo te sentiste jugando con tus compañeros de equipo?”. La pregunta pretende establecer el grado de satisfacción de los estudiantes realizando la actividad en equipo.

Finalmente, se incluye la pregunta “¿Qué método te gusta más, con el robot o sin el robot?”, con dos únicas opciones, con el propósito de determinar la preferencia de los estudiantes entre el método propuesto y la técnica clásica. La pregunta final de esta encuesta es “¿Te gustaría realizar

Diseño de un entorno pedagógico para la enseñanza de temas básicos en educación primaria con el uso de kits de robótica comercial

Glen Camilo Ortega Díaz
glen.ortega@usantotomas.edu.co

Andrés Felipe Téllez Rodríguez
andrestelz@usantotomas.edu.co

Director:

Ing. José Guillermo Guarnizo Marín
jose.guarnizo@usantotomas.edu.co

Facultad de Ingeniería Electrónica
Universidad Santo Tomás
Bogotá, D.C.
2018

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA



GUÍA PARA EL DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD

Entorno pedagógico para la enseñanza de temas básicos en primaria con Kits de robótica



BOGOTÁ - PEX: 0170 547 83 37 Línea gratuita nacional: 01 8000 111 380
Calle No. 9 - 47 70 11 P. Ave. Santa Sofía de Fontibona, Bogotá, Colombia
VICERRECTORÍA GENERAL DE UNIVERSIDAD ABERTA Y DISTANCIAS Tel: 0170 905 0100
Calle No. 16 - 47 70 50 Fontibona, Bogotá, Colombia
NIT: 900012351-6



Institución de Educación Superior sujeta a la inspección y vigilancia del Ministerio de Educación Nacional - SINAES 1704

- a. Presione el botón naranja del Lego hasta que éste se encienda.



- b. Asegúrese que el icono de Bluetooth esté activo.



- c. Seguidamente seleccione la opción de "My Files" en el menú principal.

- d. Seleccione la opción seguidor de línea y de "Run".

- e. Ahora divida el grupo de estudiantes en 2 equipos.

- f. Pida a los estudiantes que escojan el nombre del equipo.

- g. Digite los nombres de cada equipo en la aplicación móvil en la siguiente sección.

- h. Después de pulsar el botón

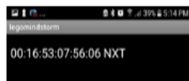
LEGO MINDSTORMS

Nombre del equipo

Equipo 1

Equipo 2

"Comenzar", la aplicación solicitará la conexión Bluetooth con el dispositivo Lego. En esta parte usted debe darle en la siguiente opción.



- i. Solicite a cada uno de los equipos que seleccionen un representante en cada turno y reúnelos.

- j. Antes de comenzar los equipos tendrán dos ayudas por cada representante, estas serán:

1. Preguntar al equipo en caso de no saber la respuesta.
2. Tiempo extra para el desarrollo de la operación (10 segundos más).

- k. El docente contará con un formato de reporte en el cual anotará el nombre del estudiante y la operación matemática con la que el representante actual tenga dificultad para contestar. (Ver archivo Formato de reporte)

- l. Después de que cada representante conteste la pregunta, el equipo debe reasignar otro representante para que este conteste la siguiente pregunta, así hasta que el Lego se encuentre en la meta.

- m. Al finalizar del circuito, el docente le mostrará a cada uno de los equipos las operaciones matemáticas con las que los representantes tuvieron dificultades. El equipo deberá enseñar al estudiante la forma correcta de desarrollar la operación que se le dificultó.

- n. Haga una reevaluación a cada estudiante que esté anotado en el formato de reporte para reforzar su conocimiento en las operaciones matemáticas.



Figura 11. Folleto guía para la actividad.



CUESTIONARIO DE ACTIVIDAD

Marca con una X la puntuación que considere más acorde con la actividad (1 muy deficiente, 5 excelente)

Preguntas		1	2	3	4	5
¿Cómo calificas la actividad?		☹️	😞	😐	😊	😄
¿Cómo calificas la aplicación en el celular?						
¿Cómo consideras la presencia del robot en la actividad?						
¿Sientes que aprendiste jugando con tony?						
¿Cómo te sentiste jugando con tus compañeros de equipo?						
Comentarios:						

¿Qué método te gusta más con el robot o sin el robot?

Con Robot Sin Robot

¿Te gustaría realizar la actividad otra vez?


Sí No

Figura 12. Encuesta de satisfacción a los estudiantes.

la actividad otra vez?”, con respuesta sí o no, busca determinar si los estudiantes desean realizar una actividad similar.

Posteriormente se realiza una encuesta al docente con propósito de conocer su percepción frente a la actividad realizada, en esa encuesta el docente puede evaluar entre 1 y 5, siendo 1 la mínima calificación y 5 la máxima, las preguntas son presentadas en la Figura 13. Como se observa, también se le pregunta si les gusta la actividad con el robot, así como si realizarían la actividad nuevamente. También se le permite al docente realizar comentarios o sugerencias. En La Figura 14 se presenta una tabla que puede utilizar el docente de la asignatura con el fin de anotar resultados individuales para actividades de seguimiento estudiantil.

El formulario de seguimiento es entregado al docente al inicio de la actividad con el fin de anotar el nombre de los estudiantes participantes y su respectivo equipo. Las encuestas tanto a los estudiantes como al profesor se entregan una vez finalizada la actividad, para que sea diligenciada de forma individual, buscando evaluar la percepción que tiene la actividad entre sus participantes.



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

CUESTIONARIO DE ACTIVIDAD

Nombre y apellidos: _____


Marque con una X la puntuación que considere más acorde con la actividad realizada (1 muy deficiente, 5 excelente)

Preguntas	1	2	3	4	5
Considera que el uso de robótica en la enseñanza para los niños es...					
En su experiencia como docente considera que la actividad del entorno pedagógico tuvo contenido educativo.					
Califique que tan lúdica es la actividad con respecto a la conducta de los estudiantes.					
En su conocimiento de docente, como califica la atención que los estudiantes tuvieron frente al prototipo.					
¿Cree usted que actividades como estas pueden lograr mejores resultados académicos en los alumnos?					
En su experiencia personal califique la actividad.					


Comentarios, Sugerencias: _____

¿Qué método le gusta más, con el robot o sin el robot?
 Con Robot Sin Robot

¿Te gustaría realizar la actividad otra vez?
 Sí No



BOGOTÁ - PEB: (57) 587 8797 Línea gratuita nacional: 01 8000 111 180
 Carrera 5, n.º 50-11 / www.usatombia.edu.co / contacto@usatombia.edu.co
 VICERRECTORÍA GENERAL DE UNIVERSIDAD ABIERTA Y A DISTANCIA - Tel: (57) 595 0000
 Carrera 10, n.º 72-50 / www.usatombia.edu.co / admision@usatombia.edu.co
 NIT: 8160012357-6



Agencia de Acreditación

Institución de Educación Superior sujeta a la inspección y vigilancia del Ministerio de Educación Nacional - SNEE 1304

Figura 13. Cuestionario de la actividad para el docente.

3. Validación del entorno pedagógico para la enseñanza de matemáticas

Con fines de validación, se realizó una prueba en la Institución Educativa Luis Carlos Galán Sarmiento, del municipio de Soacha, Cundinamarca, donde se realizó la actividad con 40 niños estudiantes de los grados tercero y quinto, en cinco sesiones con grupos de ocho niños. En la Figura 15 se presenta el sistema con el robot, la pista montada y la aplicación en el teléfono móvil.



Formato Reporte

Equipo 1		Equipo 2	
Nombre del equipo:		Nombre del equipo:	
Nombre y apellido del estudiante	Operación matemática que se le dificultó al estudiante	Nombre y apellido del estudiante	Operación matemática que se le dificultó al estudiante
	X =		X =
	X =		X =
	X =		X =
	X =		X =
	X =		X =
	X =		X =
	X =		X =
	X =		X =



Figura 14. Formato de seguimiento estudiantil.

A los estudiantes se les explicó la dinámica de la actividad presentándoles el robot con el nombre de “Tony”, dándoles las instrucciones de que para que Tony pudiera llegar a la meta deberían responder de forma correcta las preguntas de matemáticas, de tal manera que si la respuesta es correcta el robot avanzaría a la siguiente estación, emitiendo un sonido de ladrido y simultáneamente moviendo la cabeza. Una vez un estudiante responde le pasa el teléfono celular a otro estudiante para que responda la pregunta, así hasta que finalmente cada estudiante responda por lo menos dos veces, cuando el estudiante falla en responder deberá pasarle el celular al equipo contrario. Finalmente, gana el equipo que más puntos tenga después de que cada participante en cada equipo respondiera dos veces. Mientras la actividad se desarrolla el docente toma nota en el formato de seguimiento presentado previamente en la Figura 14. En la Figura 16 se presenta una foto de la actividad.

Una vez finaliza la actividad se les suministra a los estudiantes las encuestas, explicando que la cara feliz 😄 corresponde a una calificación excelente, la cara alegre 😊 corresponde a una calificación buena, la cara neutra 😐 equivale a una calificación aceptable, la cara de preocupación 😟 expresa la calificación como regular, finalmente la cara triste 😞 es una calificación deficiente. Se aclara que no todas las preguntas fueron respondidas por los estudiantes.

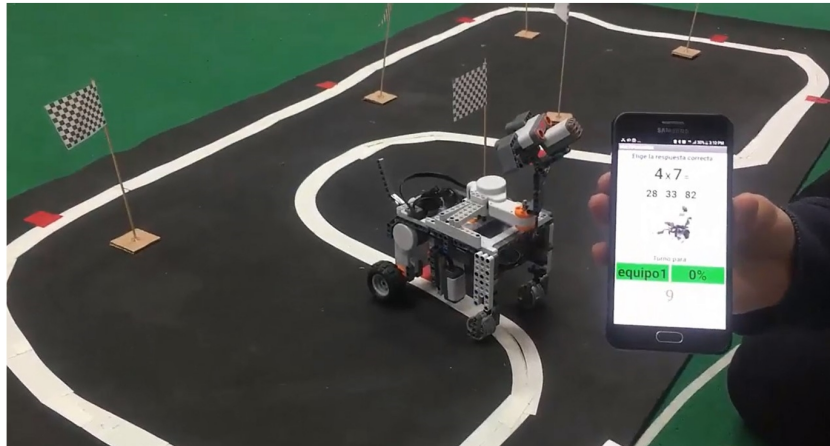


Figura 15. Robot, pista y aplicación en dispositivo móvil.



Figura 16. Desarrollo de la actividad con los estudiantes.

Al realizar la actividad en los cinco grupos se evidenció en todo momento alegría por parte de los estudiantes al interactuar con la plataforma robótica, comportamiento que ha sido reportado en la literatura en trabajos como [28], donde el autor señala que plataformas como la presentada en este artículo tienen como objetivo motivar a los estudiantes a aprender mientras están jugando. También se resalta que contrario a lo que los autores del artículo esperaban, el comportamiento de los niños en la actividad fue muy respetuoso y disciplinado, ya que en ningún momento los niños trataron de tocar el robot o interferir de otros modos con la actividad.

En la Tabla I se presentan los resultados de las preguntas realizadas a los estudiantes. NR corresponde a los estudiantes que no respondieron la pregunta. Como se puede observar ante la pregunta de cómo califican los estudiantes la actividad, la gran mayoría de los encuestados reportaron una gran simpatía hacia la misma, ya que el 67,5 % de los estudiantes apreciaron la actividad como excelente, 17,5 % como buena, solamente un 5 % de los estudiantes le dieron una calificación de aceptable y 2,5 % como deficiente; no obstante, y dados los demás resultados observados en la Tabla I, esa calificación de deficiente corresponde a la respuesta de un solo estudiante sobre los 40 encuestados, es un valor atípico dada la tendencia encontrada. Al preguntar sobre la aplicación en el teléfono celular, la calificación de excelente aumentó al 72,5 %, siendo buena para el 15 % y aceptable apenas para un 2,5 %, sin tener calificaciones menores. Sobre la percepción del robot en la actividad se obtuvieron los porcentajes más altos de satisfacción, al llegar al 85 % el excelente, 5 % bueno y 5 % aceptable. Igualmente, la gran mayoría de estudiantes evalúan de forma excelente la pregunta si aprendieron jugando con el robot (el 80 %), 5 % lo evalúan como bueno y 7,5 % un aceptable. Hay una leve disminución de las evaluaciones en el momento de preguntar sobre la percepción de la actividad jugando con los compañeros, ya que el excelente fue de 72,5 %, bueno 10 % y aceptable 10 %. Como se puede apreciar, la única pregunta que tuvo un estudiante que calificó alguna pregunta con deficiente es la evaluación de la actividad, ninguna pregunta tuvo una evaluación de aceptable, en todas las preguntas siempre hubo entre dos y cuatro estudiantes que no respondieron esa pregunta en particular, aunque todos los 40 estudiantes respondieron al menos una pregunta de la encuesta.

Tabla I. Respuestas a las 5 preguntas de evaluación de la actividad.

	Deficiente	Regular	Aceptable	Bueno	Excelente	NR
¿Cómo calificas la actividad?	2,5 %	0	5 %	17,5 %	67,5 %	7,5 %
¿Cómo calificas la aplicación en el celular?	0	0	2,5 %	15 %	72,5 %	10 %
¿Cómo consideras la presencia del robot en la actividad?	0	0	5 %	5 %	85 %	5 %
¿Siente que aprendiste jugando con Tony?	0	0	7,5 %	5 %	80 %	7,5 %
¿Cómo te sentiste jugando con tus compañeros de equipo?	0	0	10 %	10 %	72,5 %	7,5 %

En la Tabla II se presentan los resultados a dos preguntas adicionales que se le realizaron a los estudiantes, nuevamente NR corresponde a que no respondieron la pregunta. Cuando se les pregunta por el método que les gustó más, 36 de los 40 estudiantes respondieron que les gusta más la clase con el robot, los cuatro restantes no respondieron la pregunta. Finalmente, se les pregunta si les gustaría repetir la actividad respondiendo que sí 36 estudiantes, un estudiante responde no, con tres estudiantes que se abstienen de responder.

Al preguntarle al docente sobre la actividad en un formulario suministrado al final de esta, respondió que considera el uso de la robótica en el aula como excelente, así como también consideró excelente el contenido educativo de la actividad, el docente calificó como buena la lúdica de la actividad dado el interés de los estudiantes, evaluando también como excelente la atención de los estudiantes en la actividad. El docente consideró que este tipo de actividades pueden mejorar los resultados académicos.

Tabla II. Respuestas a preguntas sobre comparación y repetición del ejercicio.

¿Qué método te gusta más con el robot o sin el robot?		
Con Robot	Sin Robot	NR
90 %	0 %	10 %
¿Te gustaría realizar la actividad otra vez?		
Sí	No	NR
90 %	5 %	5 %

Los resultados de las encuestas señalan una satisfacción general por parte de los estudiantes frente al uso del robot y la aplicación en el teléfono móvil, ya que mayoritariamente respondían de forma favorable a las preguntas realizadas en las encuestas de satisfacción de la actividad. Asimismo, 36 de los 40 niños encuestados manifestaron que les agradó más la actividad con el robot, 36 de los encuestados también señalaron que les gustaría volver a realizar actividades académicas similares con el robot en una próxima ocasión. Estos datos sugieren que los niños gustan del uso de tecnologías en robótica y aplicaciones, planteando la posibilidad de seguir aplicando distintas tecnologías en clase, de forma paralela a la enseñanza tradicional.

Como se puede apreciar en los resultados anteriores, los niños presentan en su gran mayoría un gusto por este tipo de actividades de naturaleza lúdica utilizando robots y demás tecnologías como aplicaciones celulares. Los niños presentan mucho interés por los robots, manifestando constante curiosidad por las distintas funciones que puedan realizar, siempre manteniendo mucha disciplina en las actividades. El docente acompañante manifestó satisfacción tanto por los resultados obtenidos como por el interés mostrado por los estudiantes en el desarrollo de esta actividad que involucra el uso de la robótica y herramientas de las TIC para la enseñanza de las matemáticas, ya que presenta una interesante estimulación en el proceso de aprendizaje.

4. Conclusiones y trabajos futuros

En este artículo se presentó la construcción de un entorno pedagógico para la enseñanza en temas de básica primaria mediante el uso de una plataforma robótica comercial y una aplicación en un teléfono móvil. Se seleccionó una clase de matemáticas teniendo en cuenta los resultados de Colombia en las pruebas Pisa, ya que se evidenció una notable deficiencia en esta área. Al realizar la actividad con los estudiantes se manifestó constantemente una motivación por aprender, presentando siempre disciplina pese a ser la actividad en grupos y utilizar el robot que es bastante llamativo para los niños. La actividad fue enfocada en la respuesta de los niños ante operaciones aritméticas, así que puede ser utilizada tanto para una clase de refuerzo como para procesos de evaluación de los temas previamente enseñados, saliendo del rigor de una evaluación escrita y ofreciendo un escenario dinámico, novedoso, interactivo y que involucra el uso de nuevas tecnologías. Igualmente, se considera que una ventaja de involucrar el uso de robots, así como tecnologías de la información y las telecomunicaciones en procesos de educación infantil, es atraer a los estudiantes desde temprana edad a este tipo de entornos, fomentando su uso a distintas aplicaciones y generando un

mayor interés para el estudio de carreras en ciencia e ingeniería.

Los resultados de las encuestas de satisfacción realizadas a los estudiantes mostraron que la actividad pedagógica realizada con el entorno propuesto fue mayoritariamente calificada como excelente o buena, también los estudiantes consideraron que aprendieron mejor involucrando estas herramientas tecnológicas que en una clase tradicional. De acuerdo con los resultados de las encuestas, se puede concluir que este tipo de actividades estimulan el trabajo en equipo entre compañeros, así como el interés de aplicar tecnologías en las clases, ya que mayoritariamente los estudiantes manifestaron que les gusta más la clase con el robot y que les gustaría volver a utilizarlo en otras clases.

Si bien se utilizó para la construcción del robot la plataforma comercial Lego Mindstorm, dada su facilidad para el diseño de la forma del robot, facilidad en la programación y bajo costo, estas características pueden ser obtenidas a partir de otro tipo de robots construidos a un costo menor, pero manteniendo las características más llamativas que son un diseño atractivo, *software* compatible con computadores portátiles, tabletas o teléfonos celulares y facilidad en su operación, ya que estas aplicaciones siempre estarán dirigidas a personas que no necesariamente tienen un nivel avanzado en conocimientos de informática o robótica.

En futuros trabajos, con el fin de poder realizar un análisis más cualitativo, se repetirá esta misma actividad en otros colegios en la ciudad de Bogotá D.C. a una población mucho más amplia de estudiantes. También se propone el uso de estas aplicaciones en áreas diferentes a las matemáticas, así como desarrollar sistemas similares, pero orientados a otro tipo de público como puede ser población adolescente, tercera edad o personas con discapacidad. Asimismo, se propone la construcción de robots modulares y de fácil programación, pero con sensores adecuados, ello con el fin de bajar los costos del sistema, pero manteniendo las ventajas como un diseño atractivo en el aspecto del robot, facilidades en la programación, así como sencillez en su aplicación.

Referencias

- [1] A. Suárez, D. García, P. A. Martínez y J. Martos, “Contribución de la robótica educativa en la adquisición de conocimientos de matemáticas en la Educación Primaria”, *Magister: Revista miscelánea de investigación*, vol. 30, n.º 1-2, pp. 43-54, 2018. <https://doi.org/10.17811/msg.30.1.2018.43-54> ↑42
- [2] S. R. Parra, M. G. Gómez y M. M. Pintor, “Factores que inciden en la implementación de las TIC en los procesos de enseñanza-aprendizaje en 5º de Primaria en Colombia”, *Revista Complutense de Educación*, vol. 26, pp. 197-213, 2015. https://doi.org/10.5209/rev_RCED.2015.v26.46483 ↑42
- [3] M. L. Quintero, “Las TIC en la maleta pedagógica de los docentes ¿Una cuestión de competencias?”, en *Memorias Seminario Internacional: Educación e Innovación Social Educativa*, Cali, 2016. ↑42
- [4] V. Ramnarain-Seetohul, D. Beegoo y T. Ramdhony, “Case study of a mobile based application for kindergarten schools in Mauritius”, en *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (EmergiTech)*, Balaclava, 2016. ↑43
- [5] L. P. Quiroga, “La robótica: otra forma de aprender”, *Revista Educación y Pensamiento*, vol. 25, n.º 25, pp. 51-64, 2018. ↑43
- [6] A. Nusayr y R. da Silva, “The Use of Educational Robots to Engage the Youth in Computer Science: A Case Study”, en *2019 Latin American Robotics Symposium (LARS)*, Rio Grande, 2019. ↑43
- [7] R. A. Arias, G. Y. Ayala, E. P. Bravo, M. E. Campaña y L. M. Cuero, “La Robótica Pedagógica como Herramienta para la Construcción de Aprendizajes Significativos en el Aula”, en *VII Coloquio Internacional de Educación*, Popayán, 2016. ↑43

- [8] M. L. Pinto-Salamanca, N. Barrera-Lombana y W. J. Pérez-Holguín, “Uso de la robótica educativa como herramienta en los procesos de enseñanza”, *Ingeniería Investigación Y Desarrollo*, vol. 10, n.º 1, pp. 15-23, 2010. ↑
43
- [9] E. Peña, Y. Yermanos y I. Mondragón, “Construcción de un robot móvil didáctico, para trabajo con niños de básica primaria”, tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2002. ↑43
- [10] J. S. Álvarez, J. A. Jiménez y J. F. Ramírez, “Design Cycle of a Robot for Learning and the Development of Creativity in Engineering”, *Dyna*, vol. 78, n.º 170, pp. 51-58, 2011. ↑43
- [11] L. C. Correa, M. M. Vallejo, J. J. Martínez y J. A. Trujillo, “Herramienta de robótica educativa basada en Lego Mindstorms y VEX Robotics mediante software 3D y diseño mecatrónico”, *Revista ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información*, vol. 34, n.º 10, pp. 1-19, 2019. <http://dx.doi.org/10.17013/risti.34.1-19> ↑
43
- [12] F. A. Guasmayan y N. A. González, “Estado del arte de redes educativas para el intercambio de conocimientos en robótica educativa”, *Ingeniería E Innovación*, vol. 7, n.º 2, pp. 17-21, 2019. <https://doi.org/10.21897/23460466.1784> ↑43
- [13] F. Á. Bravo y A. Forero, “La Robótica Como Un Recurso Para Facilitar El Aprendizaje Y Desarrollo De Competencias Generales”, *Teoría de la Educación. Educación y Cultura en la Sociedad de la Información*, vol. 13, n.º 2, pp. 120-136, 2012. <https://doi.org/10.14201/eks.9002> ↑43
- [14] N. Barrera, “Uso de la robótica educativa como estrategia didáctica en el aula”, *Praxis y Saber*, vol. 6, n.º 11, pp. 215-243, 2015. <https://doi.org/10.19053/22160159.3582> ↑43
- [15] M. J. Mahecha, “Implementación de línea robótica escolar”, Trabajo de grado, Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, 2015. ↑43
- [16] J. González, I. Morales, L. Muñoz, M. Nielsen y V. Villarreal, “Mejorando la enseñanza de la matemática a través de la robótica”, en III Congreso Internacional en Inteligencia Ambiental, Ingeniería de Software y Salud Electrónica y Móvil AmITIC 2019, Pereira, 2019. ↑43
- [17] D. Scaradozzi, L. Sorbi, A. Pedale, M. Valzano y C. Vergine, “Teaching Robotics at the Primary School: An Innovative Approach”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 174, p. 3838-3846, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.01.1122> ↑43
- [18] S. Serholt, “Breakdowns in children’s interactions with a robotic tutor: A longitudinal study”, *Computers in Human Behavior*, vol. 81, pp. 250-264, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.12.030> ↑44
- [19] C. Angeli y N. Valanides, “Developing young children’s computational thinking with educational robotics: An interaction effect between gender and scaffolding strategy”, *Computers in Human Behavior*, vol. 105, pp. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.03.018> ↑44
- [20] Ministerio de Educación Nacional, “Informe nacional de resultados”. [En línea]. Disponible en: <https://www.icfes.gov.co/documents/20143/237304/Informe%20nacional%20pisa-2015.pdf> ↑
44
- [21] I. Papadopoulos, R. Lazzarino, S. Miah, T. Weaver, B. Thomas y C. Koulouglioti, “A systematic review of the literature regarding socially assistive robots in pre-tertiary education”, *Computers and Education*, vol. 155, pp. 1-20, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.103924> ↑44
- [22] Y. Lau, D. G. H. Chee, X. P. Chow, S. H. Wong, L. J. Cheng y S. T. Lau, “Humanoid robot-assisted interventions among children with diabetes: A systematic scoping review”, *International Journal of Nursing Studies*, vol. 111, pp. 1-10, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2020.103749> ↑44
- [23] N. I. Arshad, A. S. Hashim, M. M. Ariffin, N. M. Aszemi, H. M. Low y A. A. Norman, “Robots as Assistive Technology Tools to Enhance Cognitive Abilities and Foster Valuable Learning Experiences among Young Children With Autism Spectrum Disorder”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 116279-116291, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001629> ↑44
- [24] E. Y.-h. Chung, “Robot-Mediated Social Skill Intervention Programme for Children with Autism Spectrum Disorder: An ABA Time-Series Study”, *International Journal of Social Robotics*, pp. 1-20, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12369-020-00699-w> ↑45, 46, 47, 48
- [25] I. Calvo, I. Cabanes, J. Quesada y O. Barambones, “A Multidisciplinary PBL Approach for Teaching Industrial Informatics and Robotics in Engineering”, *IEEE Transactions on Education*, vol. 61, n.º 1, pp. 21-28, 2018. <https://doi.org/10.1109/TE.2017.2721907> ↑45
- [26] D. Viedma, A. Meza, I. Pertuz, C. Medrano, E. Acosta y J. Roldán, “Application of color sensor programming with LEGO-Mindstorms NXT 2.0 to recreate a simplistic plague detection scenario”, *Scientia et Technica*, vol. 22, n.º 3, pp. 268-272, 2017. ↑48

- [27] T. S. Georgiev, "Students' Viewpoint about Using MIT App Inventor in Education", en 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, 2019. ↑48
- [28] A. Soriano, L. Marín, M. Vallés, A. Valera y P. Albertos, "Low Cost Platform for Automatic Control Education Based on Open Hardware", *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, n.º 3, pp. 9044-9050, 2014. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01909> ↑56

Glen Camilo Ortega Díaz

Ingeniero Electrónico Universidad Santo Tomás; pertenece como investigador al Grupo de Estudio y Desarrollo en Robótica GED.

Correo electrónico: glen.ortega@usantotomas.edu.co

Andrés Felipe Téllez Rodríguez

Ingeniero Electrónico Universidad Santo Tomás; pertenece como investigador al Grupo de Estudio y Desarrollo en Robótica GED.

Correo electrónico: andrestellez@usantotomas.edu.co

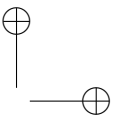
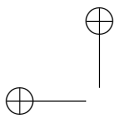
José Guillermo Guarnizo Marín

Doctor en Automática, Robótica e Informática Industrial, de la Universidad Politécnica de Valencia; Magíster en Ingeniería, Automatización Industrial, de la Universidad Nacional de Colombia; Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; docente de la Universidad Santo Tomás; pertenece como investigador al Grupo de Estudio y Desarrollo en Robótica GED.

Correo electrónico: jose.guarnizo@usantotomas.edu.co

Edgar Camilo Camacho Poveda

Magíster en Ingeniería Electrónica, de la Universidad Nacional de Colombia; Ingeniero Electrónico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Tunja; docente de la Universidad Santo Tomás; pertenece como investigador al Grupo de Estudio y Desarrollo en Robótica GED. Correo electrónico: edgarcamacho@usantotomas.edu.co








Research

REVISTA
Ingeniería

Performance Analysis of CNN Layers for Heterogeneous FPGAs-based Architectures Using HLS

Análisis de desempeño de capas de CNN para arquitecturas heterogéneas basadas en FPGAs usando HLS

Mateo Guerra-Londono ^{*},¹, **Luis Castano-Londono** ¹, **Cristian Alzate-Anzola** ¹, **David Marquez-Viloria** ¹, **Ricardo Velasquez-Velez** ²

¹Automática Electrónica y Ciencias Computacionales, Facultad de Ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano (Medellín, Colombia), ²Sistemas Embebidos e Inteligencia Computacional, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia UdeA, Calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia

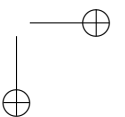
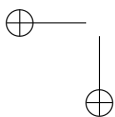
*Correo de correspondencia: mateoguerra251449@correo.itm.edu.co

Received: 02-12-2019. Modified: 09-11-2020. Accepted: 21-11-2020

Open access



Cite this paper as: M. Guerra-Londono, L. Castano-Londono, C. Alzate-Anzola, D. Marquez-Viloria y R. Velasquez-Velez, "Análisis de desempeño de capas de CNN para arquitecturas heterogéneas basadas en FPGAs usando HLS", Revista Ingeniería, vol. 26, n.º 1, pp. 62-76 (2021).
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.15634>



Abstract

Context: Convolutional neural networks (CNNs) are currently used in a wide range of artificial intelligence applications. In many cases, these applications require the execution of the networks in real time on embedded devices. Hence the interest in these applications achieving excellent performance with low power consumption. CNNs perform operations between the input data and the network weights, with the particularity that there is no dependence between most of the operations. Thus, the inherent parallelism of Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) can be used to perform multiple operations in parallel, maintaining the good performance per watt that characterizes these devices. This paper focuses on evaluating the convolution algorithm for a convolutional layer of neural networks by exploring parallelization directives using VIVADO HLS, and it aims to evaluate the performance of the algorithm using optimization directives.

Method: The methodology consists of an exploration of the design space of a convolutional neural network layer implementation using VIVADO HLS. Performance verification of the FPGA was performed by comparing the output data with the same convolution algorithm implemented in MATLAB. A layer of the commercial version Xilinx DNNK was used as a reference for performance measurements of the different implementations obtained during the exploration of the design space. In this work, multiple variations of optimization directives are used, such as pipeline, array partition and unroll.

Results: This paper presents the results of a reference implementation (without optimization directives) of the convolution algorithm concerning algorithm latency and the hardware resources used by the FPGA. The results are compared with the implementations of the algorithm, including different combinations of two optimization directives (pipeline and partition array).

Conclusions: This work explores the design space of a convolution algorithm for a convolutional neural network layer on FPGAs. The exploration includes the effect of data transfer between DDR memory and the on-chip memory of the FPGA. Also, said effect is caused by the optimization directives in VIVADO HLS on the different cycles of the algorithm.

Keywords: Convolution, convolutional neural network, FPGA, high-level synthesis, optimization directives.

Acknowledgements: This work was supported in part by the Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales Group (COL0053581) - Instituto Tecnológico Metropolitano and in part by Sistemas Embebidos e Inteligencia Computacional Group (COL0010717) - Universidad de Antioquia under Grant P17224.

Language: Spanish.

Resumen

Contexto: Las redes neuronales convolucionales (CNNs) son actualmente utilizadas en una amplia gama de aplicaciones de inteligencia artificial. En muchos casos, dichas aplicaciones requieren la ejecución de las redes en tiempo real en dispositivos integrados. Por esto, el interés es que estas aplicaciones puedan alcanzar un buen desempeño con bajo consumo de potencia. Las CNNs realizan operaciones entre los datos de entrada y los pesos de la red, con la particularidad de que no existe dependencia entre la mayoría de las operaciones. Por tal motivo, el paralelismo inherente de los FPGAs puede ser usado para realizar múltiples operaciones en paralelo, manteniendo el buen desempeño por vatio que caracteriza a estos dispositivos. Este artículo se enfoca en la evaluación del algoritmo de convolución para una capa convolucional de redes neuronales explorando directivas de paralelización usando VIVADO HLS, y su objetivo es evaluar el desempeño del algoritmo utilizando directivas de optimización.

Método: La metodología consiste en una exploración del espacio de diseño de la implementación de una capa de una red neuronal convolucional usando VIVADO HLS. La verificación del funcionamiento del FPGA fue realizada comparando los datos de salida con el mismo algoritmo de convolución implementado en MATLAB. Una capa de la versión comercial Xilinx DNNK fue usada como referencia para las medidas de desempeño de las diferentes implementaciones obtenidas en la exploración del espacio de diseño. En este trabajo se utilizan múltiples variaciones de directivas de optimización, tales como *pipeline*, *array partition*, y *unroll*.

Resultados: Este trabajo presenta los resultados de una implementación de referencia (sin directivas de optimización) del algoritmo de convolución con respecto a la latencia del algoritmo y los recursos de hardware utilizados por la FPGA. Los resultados se comparan con implementaciones del algoritmo, incluyendo diferentes combinaciones de dos directivas de optimización (*pipeline* y *partition array*).

Conclusiones: Este trabajo explora el espacio de diseño de un algoritmo de convolución para una capa de red neuronal convolucional sobre FPGAs. La exploración incluye el efecto causado por la transferencia de los datos entre la memoria DDR y la memoria *on-chip* del FPGA. Además, dicho efecto es causado por las directivas de optimización en Vivado HLS sobre los diferentes ciclos del algoritmo.

Palabras clave: Convolución, directivas de optimización, FPGA, red neuronal convolucional, síntesis de alto nivel.

Agradecimientos: Este trabajo se enmarca dentro del proyecto "Mejora de la percepción visual en robots humanoides para el reconocimiento de objetos en entornos naturales mediante aprendizaje profundo" con código P17224, cofinanciado por el Instituto Tecnológico Metropolitano y la Universidad de Antioquia. Mateo Guerra agradece al programa "Jóvenes Investigadores e Innovadores ITM" del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM).

Idioma: Español

1. Introducción

En años recientes, las redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés de *Convolutional Neural Network*) han sido utilizadas en aplicaciones de inteligencia artificial para el reconocimiento de voz, identificación de patrones, detección, seguimiento de objetos, etc. Debido a que las CNN requieren altas capacidades de procesamiento, la utilización de FPGA (por sus siglas en inglés de *Field Programmable Gate Arrays*) para su implementación ha atraído mucha atención porque estos dispositivos son reconfigurables, aprovechan el paralelismo en las CNN y son efi-

cientes en consumo de potencia [6].

El diseño de algoritmos sobre FPGAs se ha realizado tradicionalmente usando metodología RTL (por sus siglas en inglés de *Register-Transfer Level*) usando lenguajes de descripción de *hardware* (HDL, por sus siglas en inglés de *Hardware Description Language*) como VHDL o Verilog. Estos lenguajes requieren experiencia en diseño digital de *hardware* aumentando la complejidad del flujo de diseño. Por esto, en los últimos años se viene popularizando el diseño de *hardware* a nivel algorítmico por medio de herramientas de síntesis de alto nivel (HLS, por sus siglas en inglés de *High-level synthesis*). Estas herramientas permiten describir las arquitecturas de *hardware* usando lenguajes de programación de alto nivel como C/C++ o Python, disminuyendo considerablemente la complejidad del flujo de diseño y proporcionando la posibilidad de paralelización del algoritmo a través de directivas de optimización [1].

Los FPGA se han utilizado para la aceleración de las operaciones realizadas en las capas de la red por medio de diferentes técnicas de paralelización [11]. Algunos trabajos sobre la implementación de CNN en FPGA pueden encontrarse en [12], [15], [4], [13]. La paralelización de las capas convolucionales en FPGA se ha realizado utilizando metodologías de diseño convencional RTL como en [5], [9], [3], [10], y herramientas de síntesis de alto nivel (HLS) como en [13].

Las herramientas de diseño HLS permiten al programador utilizar directivas de optimización como *loop unrolling*, *array partition* y *pipeline* para lograr un rendimiento similar o incluso mejor en comparación con el diseño RTL; además, el diseñador no necesitará tener mucha experiencia en diseño de *hardware*. En [13] se utilizó Vivado HLS de Xilinx con el fin de sintetizar un acelerador para la operación de convolución, obteniendo un rendimiento máximo de 61 GFLOPS. Los autores diseñaron un acelerador CNN con OpenCL, logrando un rendimiento máximo de 136 GOPS para la capa convolucional. En [2], los autores emplearon una FPGA Arria 10 de Intel para sintetizar un acelerador CNN con OpenCL, logrando más de 1 TFLOPS. En [7] realizaron un acelerador de CNN basado en FPGA a partir de la herramienta HLS, incorporaron una arquitectura de desplazamiento de peso igual a cero y reducción de la aritmética.

Este trabajo se enfoca en la evaluación del algoritmo de convolución para una capa convolucional de redes neuronales a través de la exploración de directivas de paralelización usando Vivado HLS, y el desempeño del algoritmo es evaluado para diferentes directivas de optimización. También se explora el efecto de la transmisión de los datos entre la memoria DDR y la memoria *on-chip*. La implementación del algoritmo fue realizada en un sistema de desarrollo Ultra96 que contiene un Zynq UltraScale + MPSoC, el cual es una arquitectura heterogénea basada en FPGA. La precisión de los resultados numéricos obtenidos con la implementación en FPGA utilizando Vivado HLS son comparados con resultados obtenidos en MATLAB. Se evalúa la variación de la latencia en términos de ciclos de reloj para la primera capa convolucional de una CNN entrenada en Keras, según la forma en que se configuran algunas directivas de optimización para los diferentes arreglos y ciclos utilizados en la implementación del algoritmo. Como resultado se obtiene un bloque convolucional adaptable que puede ser utilizado para la construcción de diferentes topologías de red. Se realiza el análisis del desempeño teniendo en cuenta la latencia y los recursos de *hardware*.

2. Materiales y métodos

2.1. Sistema de desarrollo y flujo de diseño

Para este estudio se utilizó una tarjeta de desarrollo Ultra96-V1. Esta placa cuenta con un dispositivo MPSoC (por sus siglas en inglés de *Multi-Processor System-on-Chip*) que contiene un ARM Cortex-A53 de cuatro núcleos y 154K celdas de lógica programable dentro de un chip. La síntesis se realizó en Vivado HLS versión 2019.1. Esta herramienta es la encargada de convertir el código descrito en C/C++ a HDL (Figura 1).

Los pasos realizados en cada etapa de diseño se presentan en la Figura 2. La primera etapa consiste en el diseño del *software*, el cual se divide en dos pasos. En el primer paso se recomienda realizar la implementación del algoritmo de convolución en MATLAB, con el propósito de tomar los resultados obtenidos como base para la comparación con los obtenidos en Vivado HLS. En el otro paso se utiliza directamente la implementación del algoritmo en C/C++ en la CPU para obtener un código similar al de la implementación final en HLS. Los autores usan los dos pasos de la etapa de diseño de *software*.

En la etapa de implementación de *hardware* se proponen dos pasos. El primer paso es la aceleración del algoritmo de convolución usando Vivado HLS. En este paso, las directivas de paralelización se aplican al código para mejorar el rendimiento del algoritmo. En el segundo paso, el código HDL generado por Vivado HLS se sintetiza y se descarga en el FPGA.

2.2. Base de datos y arquitectura convolucional

La base de datos utilizada es la MNIST [8], la cual es una gran base de datos de dígitos (0 a 9). Contiene 60.000 imágenes de entrenamiento y 10.000 imágenes de prueba. Estas imágenes tienen un tamaño de 28x28 y están en blanco y negro. MNIST es posiblemente el conjunto de

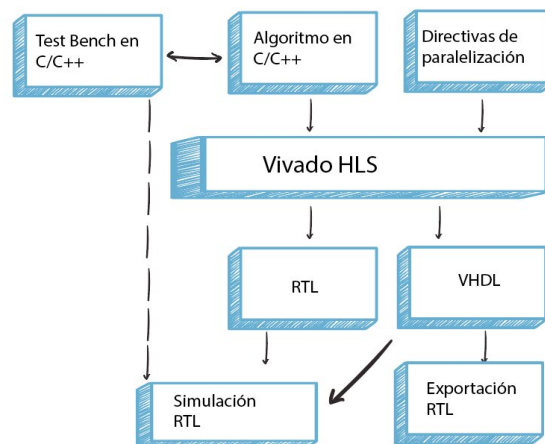


Figura 1. Flujo de diseño usando la herramienta de síntesis de alto nivel Vivado HLS.

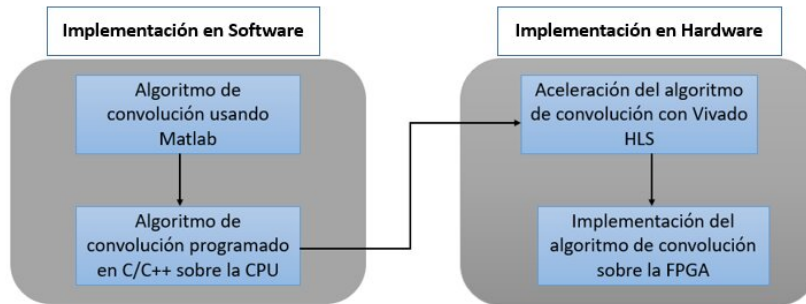


Figura 2. Metodología de diseño.

datos mejor estudiado y más comprendido en la literatura sobre visión artificial y aprendizaje automático. La arquitectura convolucional elegida consta de dos capas convolucionales seguidas de una capa *maxpooling* y conectadas a una capa totalmente conectada con su respectiva capa *softmax*. La arquitectura se observa más detalladamente en la Figura 3. El entrenamiento de la red convolucional es realizado con el *framework* Keras, el cual permite un fácil entrenamiento de estas redes usando programación en Python. La función de costo a optimizar fue la *cross-entropy* y se utilizó AdaDelta, que es una técnica de optimización del gradiente descendiente. La exactitud obtenida después del entrenamiento en el conjunto de prueba fue del 98,8 %.

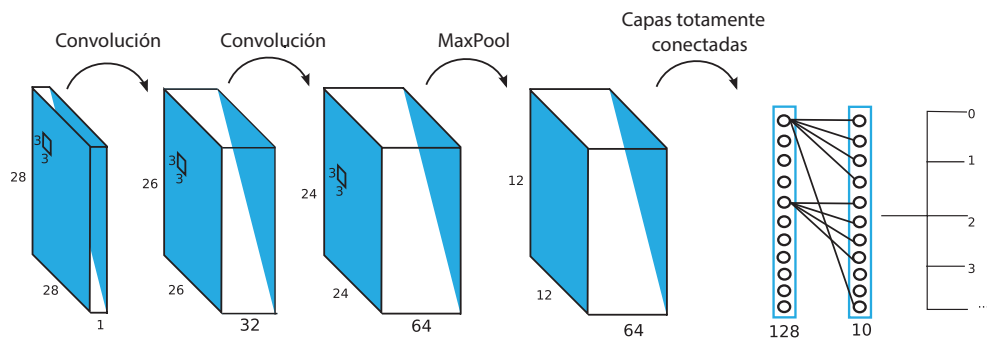


Figura 3. Arquitectura convolucional.

2.3. Implementación secuencial del algoritmo de la capa convolucional

La implementación del algoritmo fue basada en la primera capa de la red convolucional de la Figura 3 y una imagen en el conjunto de datos MNIST. El algoritmo 1 muestra el pseudocódigo para la implementación de la convolución. La síntesis del diseño fue realizada usando Vivado HLS y los resultados obtenidos fueron comparados con los datos adquiridos al realizar la misma implementación del algoritmo en MATLAB, con el objetivo de validar la correcta implementación del algoritmo.

Algoritmo 1: Descripción del algoritmo de convolución

```

1 Entradas: imagen, filtros, bias
2 Salidas: resultado de la convolución
3 loop_conv2d_label0: for  $k \leftarrow 0$  to  $k < 32$  do
4   loop_conv2d_label1: for  $j \leftarrow 0$  to  $j < 26$  do
5     loop_conv2d_label2: for  $i \leftarrow 0$  to  $i < 26$  do
6        $Z0 = b0[k]$ ;
7       loop_conv2d_label3: for  $n \leftarrow 0$  to  $n < 3$  do
8         loop_conv2d_label4: for  $m \leftarrow 0$  to  $m < 3$  do
9            $Z0 = Z0 + X0[(n + j) * 28 + (m + i)] * W0[n * 3 + m + k * 9]$ ;
10          end
11        end
12       $Y[j * 26 + i + k * 676] = (Z0 < 0) ? 0 : Z0$ ;
13    end
14  end
15 end

```

2.4. Exploración del espacio de diseño

La implementación de la arquitectura base es realizada como se muestra en el diagrama de bloques en la Figura 4. Los datos correspondientes a la imagen son almacenados en la memoria RAM DDR3. Los datos de la imagen y el resultado de la convolución son transmitidos entre el sistema de procesamiento (PS) Zynq-Ultra y el núcleo de convolución utilizando dos puertos de alto desempeño AXI HP. Los valores de los *pesos* y *bias* son almacenados en memorias BRAM de doble puerto, las cuales pueden ser accedidas desde PS o el núcleo de convolución.

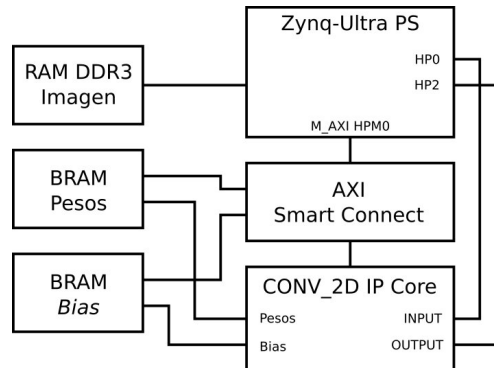
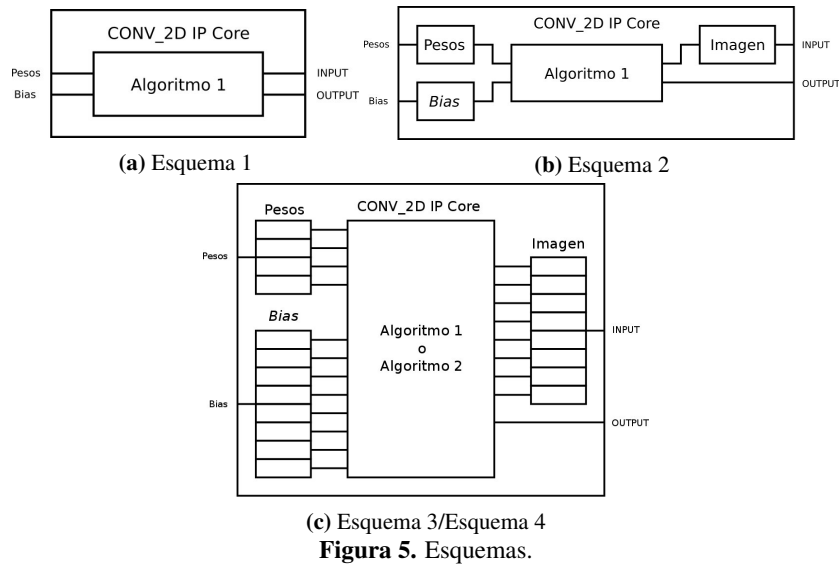


Figura 4. Diagrama de bloques de la arquitectura base.

La exploración del espacio de diseño se realiza para cuatro esquemas diferentes del núcleo de convolución, en los cuales se varía el origen de los datos que intervienen en las operaciones. El primer esquema, que se muestra en la Figura 5a, corresponde a la implementación base. En el segundo esquema, que se muestra en la Figura 5b, todos los datos de entrada son copiados en arreglos auxiliares definidos en el código del núcleo de convolución, de forma que todas las operaciones se

realizan con datos *on-chip*. En el tercer esquema, que se muestra en la Figura 5c, se aplica la directiva de partición de memoria a los arreglos auxiliares. En el cuarto esquema se realiza adicionalmente un desenrollado manual, realizando una modificación en la implementación como se muestra en el algoritmo 2. Para todos los esquemas, los resultados son escritos en memoria DDR3.



Algoritmo 2: Descripción del algoritmo de convolución con desenrollado manual

```

1 Entradas: imagen, filtros, bias
2 Salidas: resultado de la convolución
3 loop_conv2d_label0: for k ← 0 to k < 16 do
4   loop_conv2d_label1: for j ← 0 to j < 26 do
5     loop_conv2d_label2: for i ← 0 to i < 26 do
6       Z0 = b0[k];
7       Z1 = b0[k + 16];
8       loop_conv2d_label3: for n ← 0 to n < 3 do
9         loop_conv2d_label4: for m ← 0 to m < 3 do
10          Z0 = Z0 + X0[(n + j) * 28 + (m + i)] * W0[n * 3 + m + k * 9];
11          Z1 = Z1 + X0[(n + j) * 28 + (m + i)] * W0[n * 3 + m + (k + 16) * 9];
12        end
13      end
14      Y[j * 26 + i + k * 676] = (Z0 < 0)?0 : Z0;
15      Y[j * 26 + i + (k + 16) * 676] = (Z1 < 0)?0 : Z1;
16    end
17  end
18 end
    
```

Para cada esquema se evalúan siete implementaciones utilizando las directivas de optimización como se muestra en la Tabla I. Para la aceleración del algoritmo usando Vivado HLS se aplicaron directivas de optimización a los diferentes ciclos que construyen el algoritmo de convolución. Las siguientes son las diferentes directivas usadas: *Baseline* es el algoritmo implementado sin directivas de optimización, *Pipeline* es una directiva que reduce el intervalo de inicio del bucle al permitir la ejecución concurrente de las operaciones, *Unroll* es la directiva que desenrolla el ciclo total o parcialmente causando que las iteraciones se realicen en paralelo, *Array partition* separa los arreglos que contienen los datos de entrada y salida del algoritmo en distintas posiciones de memoria para ser procesados en paralelo.

Tabla I. Implementaciones realizadas para la exploración del espacio de diseño

Implementación	Directiva de optimización
Baseline	Ninguna
Optimización 1	Pipeline en loop_conv2d_label1
Optimización 2	Pipeline en loop_conv2d_label2
Optimización 3	Pipeline en loop_conv2d_label3
Optimización 4	Pipeline en loop_conv2d_label4
Optimización 5	Pipeline + Unroll en loop_conv2d_label3
Optimización 6	Pipeline + Unroll en loop_conv2d_label4

2.5. Comparación de la capa convolucional con framework de alto nivel

La aparición de metodologías de alto nivel ha impulsado el desarrollo de múltiples *frameworks* de aprendizaje profundo para FPGA. Uno de estos *frameworks* es DNNDK (por sus siglas en inglés de *Deep Neural Network Development Kit*), el cual está diseñado para reducir el consumo de energía y para facilitar la implementación de algoritmos de aprendizaje profundo en FPGA [14]. DNNDK implementa un módulo llamado DPU (por sus siglas en inglés de *Data Processing Unit*) que brinda altas prestaciones computacionales y facilita su uso en plataformas heterogéneas. Con una interfaz unificada, DPU puede ser implementado fácilmente en cualquier familia de FPGA. Las DPU son desarrolladas en C/C++ y son comparables con CUDA/OpenCL, debido a que son hechas para fácil uso. Así que DNNDK como optimización reduce el tamaño de las redes convolucionales debido a que usualmente contienen información redundante que al eliminarse se obtiene una optimización en términos de eficiencia computacional, eficiencia energética y menos memoria para el sistema, especialmente en el ancho de banda desde el *host* a la FPGA. Adicionalmente, este *framework* aplica técnicas de transformación y compilación optimizada como lo son la fusión de nodos de computación, planeación eficiente de instrucciones y el uso de características y pesos en la memoria *on-chip*. Con el objetivo de comparar estas optimizaciones con las aceleraciones propuestas anteriormente se implementó la primera capa de la arquitectura convolucional en el *framework* DNNDK.

2.6. Evaluación de desempeño

En esta etapa se analizó cada reporte de síntesis generado por Vivado HLS para cada uno de los cuatro esquemas de la exploración del espacio de diseño. Con el objetivo de observar el desempeño

en la implementación del algoritmo para los diferentes esquemas se extrajeron los datos de latencia y recursos de *hardware*. Por último, los resultados obtenidos con el *framework* DNNDK se evalúan para obtener así una tabla comparativa entre las aceleraciones propuestas y el resultado del *framework* DNNDK en términos de tiempo.

3. Resultados

La exploración del espacio de diseño se realizó para el Zynq UltraScale+MPSoC del sistema de desarrollo Ultra96. Los datos del proceso de convolución adquiridos en MATLAB y en Vivado HLS fueron comparados para verificar el resultado del algoritmo. El error máximo de la comparación es de $4,9659 \times 10^{-07}$ y el error cuadrático medio entre las dos imágenes es de $2,8813 \times 10^{-14}$.

La Figura 6 muestra la latencia expresada en ciclos de reloj para los diferentes esquemas planteados. Los valores correspondientes a la implementación *Baseline* son los resultados obtenidos para la implementación del algoritmo de convolución sin directivas de optimización. Los demás valores corresponden a la latencia para las diferentes soluciones obtenidas al aplicar la directiva *pipeline*, *unroll* y *array partition* sobre cada ciclo como se presenta en la Tabla I. La optimización 1 presenta la menor latencia en todos los esquemas propuestos, incluso en el esquema donde se trabaja con la memoria externa DDR y la optimización 2 ocupa el segundo lugar en latencia. El peor desempeño en todos los esquemas se obtiene con la optimización 5 con latencias cercanas al *Baseline* que no posee directivas de optimización.

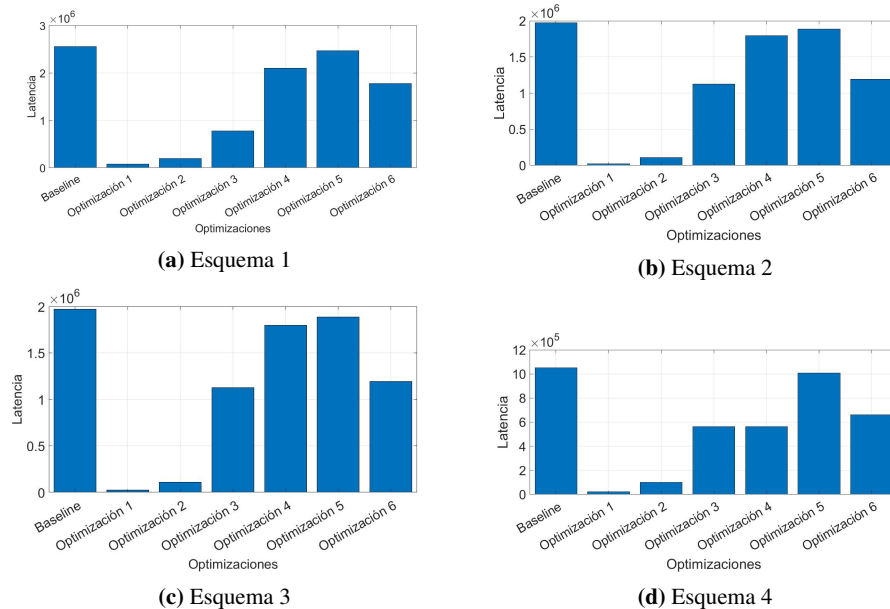


Figura 6. Latencia en ciclos de reloj de los esquemas planteados con diferentes directivas de optimización.

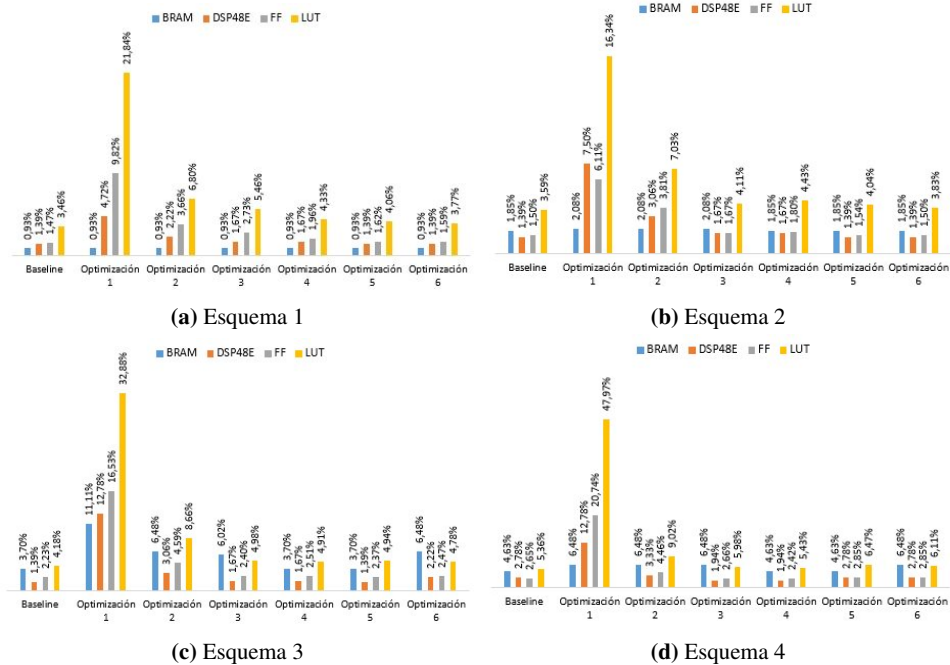


Figura 7. Consumo de recursos de *hardware* (BRAM,DSP48E, FF, LUT) para los esquemas con las diferentes directivas de optimización.

La cantidad de recursos de *hardware* utilizados en la implementación del algoritmo para cada uno de los esquemas de exploración del espacio de diseño se muestra en la Figura 7, donde para cada esquema se presenta la cantidad en porcentaje de los recursos utilizados: BRAM (por sus siglas en inglés de *Block RAM*), DSP48E (por sus siglas en inglés de *Digital Signal Processors*), FF (por sus siglas en inglés de *Flip-Flops*) y LUT (por sus siglas en inglés de *LookUp Table*). En los cuatro esquemas planteados, la optimización 1 emplea la mayor cantidad de recursos de *hardware*, esto se debe a que el algoritmo contiene ciclos anidados y la directiva es aplicada al ciclo externo, generando una mayor cantidad de *hardware* en el procesamiento de datos y unidades de control. Para la optimización 2, la cantidad de recursos de *hardware* usados equivalen a menos de la mitad de los recursos de *hardware* empleados para la optimización 1, lo que la convierte en una buena alternativa de implementación debido a que ocupa el segundo lugar en latencia.

La implementación *baseline* en cada uno de los esquemas es la que presenta el menor número de recursos utilizados, ya que al no aplicar directivas de optimización consume una menor cantidad de recursos, pues cualquier mejora en el algoritmo con directivas de optimización conlleva a un aumento de recursos de *hardware*. La Tabla II muestra la aceleración obtenida por las diferentes optimizaciones aplicadas a cada esquema con respecto a la implementación base sin directivas (esquema 1, *baseline*). En la Tabla III se observa una aceleración de más de 111 veces en los esquemas 3 y 4 usando la optimización 1. En la Tabla III se presenta la aceleración obtenida por

los esquemas 2, 3 y 4 con relación al esquema 1, comparando individualmente cada optimización. La Tabla III muestra que el esquema 3 tiene la menor latencia de todas las implementaciones realizadas en la exploración del espacio de diseño, debido a que presenta el *speed-up* más alto en la optimización 1, que es la optimización con mejor desempeño para todos los esquemas. Sin embargo, no existe una diferencia significativa con el *speed-up* presentado por el esquema 4 para la misma optimización. Adicionalmente, el esquema 4 presenta el *speed-up* más alto en el resto de los casos.

Tabla II. Speed-up con relación al *baseline* del esquema 1

	Speed-up			
	Esquema 1	Esquema 2	Esquema 3	Esquema 4
Baseline	1,000	1,281	1,296	2,430
Optimización 1	31,961	62,177	111,915	111,534
Optimización 2	13,117	23,366	23,366	25,933
Optimización 3	3,280	2,269	2,269	4,533
Optimización 4	1,217	1,405	1,422	4,533
Optimización 5	1,035	1,340	1,355	2,535
Optimización 6	1,439	2,103	2,142	3,860

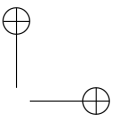
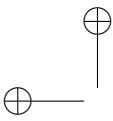
Tabla III. Speed-up respecto al esquema 1 de la exploración del espacio de diseño

	Speed-up		
	Esquema 2	Esquema 3	Esquema 4
Baseline	1,281	1,296	2,430
Optimización 1	1,945	3,502	3,490
Optimización 2	1,781	1,781	1,977
Optimización 3	0,692	0,692	1,382
Optimización 4	1,154	1,168	3,723
Optimización 5	1,294	1,309	2,449
Optimización 6	1,462	1,489	2,683

Los resultados obtenidos en el *framework* DNNDK se observan en la Tabla IV y son comparados con el esquema 4 - optimización 1, que es el esquema de mejor desempeño. El tiempo presentado por la Tabla IV está en milisegundos (ms) y se refiere al tiempo de cómputo total, es decir, tiempo del kernel y tiempo de comunicación de los datos. El DNNDK supera en 2.3X el desempeño del esquema 4 en cuanto a tiempo total de procesamiento. Sin embargo, el esquema 4 está implementado con formato numérico de 32 bits punto flotante, mientras que el *framework* DNNDK reduce a 8 bits la representación de los pesos. En cuanto a recursos de *hardware*, el esquema 4 aprovecha mejor los recursos que el *framework* DNNDK. La tabla presenta que el DNNDK consume 1.09X LUT, 2.45X FF, 5.77X BRAM, 6.3X DSP comparado con el esquema 4.

Tabla IV. Comparación de la implementación propuesta y el *framework* DNNDK para la misma capa convolucional

	Esquema 4 - optimización 1	DNNDK
Tiempo(ms)	0,234	0,101
LUT	33.851	37.055
FF	29.266	72.850
Block RAM	28	161,5
DSP	46	290



4. Conclusiones

Este trabajo presenta una exploración del espacio de diseño de una capa de una CNN y un análisis de desempeño en cuanto a latencia y consumo de recursos de *hardware*. La exploración presenta cuatro esquemas distintos y la aplicación de directivas de optimización en Vivado HLS para el algoritmo de convolución sobre arquitecturas heterogéneas basadas en FPGA. En la exploración se encontró que los esquemas presentan un mejor desempeño al aplicar la optimización 1 propuesta. El esquema 4 presenta la mejor latencia para todas las optimizaciones aplicadas. Adicionalmente, La optimización 2 ocupa el segundo lugar en latencia y consume menos de la mitad de los recursos de *hardware* utilizados en la optimización 1 para cada esquema propuesto convirtiéndose en una buena alternativa cuando se tiene pocos recursos de *hardware*. El esquema 4 tiene buen desempeño en tiempo de ejecución comparado con el *framework* DNNDK, teniendo en cuenta que el *framework* reduce a 8 bits la representación de los pesos y el esquema usa 32 bits punto flotante. También el esquema hace un mejor uso de recursos de *hardware* en contraste con el DNNDK que consume 1.09X LUT, 2.45X FF, 5.77X BRAM, 6.3X DSP comparado con el esquema 4.

Como trabajos futuros se planea realizar la implementación de la CNN completa y otras construcciones de diferentes topologías de red, teniendo en cuenta el bloque convolucional adaptable encontrado en el esquema 4 con las optimizaciones 1 y 2 en la exploración del espacio de diseño. También una exploración en cuanto a formatos numéricos de punto fijo con el fin de mejorar los tiempos de cómputo.

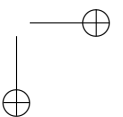
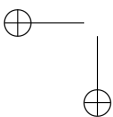
5. Agradecimientos

Este estudio fue apoyado por el grupo de investigación Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales (AE&CC - COL0053581), en el Laboratorio de Sistemas de Control y Robótica, adscrito al Instituto Tecnológico Metropolitano y el grupo de investigación Sistemas Embebidos e Inteligencia Computacional (SISTEMIC - COL0010717) de la Universidad de Antioquia. Este trabajo se enmarca dentro del proyecto “Mejoramiento de la percepción visual en robots humanoides para el reconocimiento de objetos en entornos naturales mediante aprendizaje profundo” con código P17224, cofinanciado por el Instituto Tecnológico Metropolitano y la Universidad de Antioquia.

Mateo Guerra agradece al programa “Jóvenes Investigadores e Innovadores ITM” del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM).

Referencias

- [1] D. Aledo, B. Carrion, y F. Moreno, “VHDL vs. SystemC: Design of highly parameterizable artificial neural networks”, *IEICE Transactions on Information and Systems*, E102D(3):512–521, 2019. <https://doi.org/10.1587/transinf.2018EDP7142> ↑ 65
- [2] U. Aydonat, S. O’Connell, D. Capalija, A. C. Ling, y G. R. Chiu, “An OpenCLTM deep learning accelerator on Arria 10”, en *FPGA 2017 - Proceedings of the 2017 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays*, pp. 55–64, 2017. <https://doi.org/10.1145/3020078.3021738> ↑ 65



- [3] L. Bai, Y. Zhao, y X. Huang, "A CNN Accelerator on FPGA Using Depthwise Separable Convolution", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 65, n.º 10, pp. 1415–1419, 2018. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2018.2865896> ↑ 65
- [4] S. Chakradhar, M. Sankaradas, V. Jakkula y S. Cadambi, "A dynamically configurable coprocessor for convolutional neural networks", en *Proceedings - International Symposium on Computer Architecture*, pp.247–257, 2010. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1816038.1815993> ↑ 65
- [5] W. Ding, Z. Huang, Z. Huang, L. Tian, H. Wang y S. Feng, "Designing efficient accelerator of depthwise separable convolutional neural network on fpga", *Journal of Systems Architecture*, vol.97, pp.278-286, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2018.12.008> ↑ 65
- [6] M. K. Hamdan y D. T. Rover, "VHDL generator for a high performance convolutional neural network FPGA-based accelerator", en *2017 International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs, ReConFig 2017*, Cancun, diciembre 2017. <https://doi.org/10.1109/RECONFIG.2017.8279827> ↑ 65
- [7] J. H. Kim, B. Grady, R. Lian, J. Brothers y J. H. Anderson, "FPGA-based CNN inference accelerator synthesized from multi-threaded C software", *International System on Chip Conference*, Munich, 2017. <https://doi.org/10.1109/SOCC.2017.8226056> ↑ 65
- [8] Y. LeCun, *et al.*, "Gradient-based learning applied to document recognition", *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, n.º 11, pp.2278–2324, 1998. <https://doi.org/10.1109/5.726791> ↑ 66
- [9] H. Li, X. Fan, L. Jiao, W. Cao, X. Zhou y L. Wang, "A high performance FPGA-based accelerator for large-scale convolutional neural networks", *FPL 2016 - 26th International Conference on Field-Programmable Logic and Applications*, Lausanne, 2016. <https://doi.org/10.1109/FPL.2016.7577308> ↑ 65
- [10] E. Nurvitadhi, *et al.*, "Can FPGAs beat GPUs in accelerating next-generation deep neural networks", en *FPGA 2017 - Proceedings of the 2017 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays*, febrero 2017. <https://doi.org/10.1145/3020078.3021740> ↑ 65
- [11] S. Qiao y J. Ma, "Fpga implementation of face recognition system based on convolution neural network", en *2018 Chinese Automation Congress (CAC)*, Xi'an, noviembre 2018. <https://doi.org/10.1109/CAC.2018.8623662> ↑ 65
- [12] J. Qiu, *et al.*, "Going deeper with embedded FPGA platform for convolutional neural network", en *FPGA 2016 - Proceedings of the 2016 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays*, febrero 2016. <https://doi.org/10.1145/2847263.2847265> ↑ 65
- [13] N. Suda, *et al.*, "Throughput-optimized openCL-based FPGA accelerator for large-scale convolutional neural networks", en *FPGA 2016 - Proceedings of the 2016 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays*, 2016. <https://doi.org/10.1145/2847263.2847276> ↑ 65
- [14] Xilinx and Inc, "DNNDK User Guide", reporte técnico, Xilinx and Inc., 2019. ↑ 70
- [15] C. Zhang, "Optimizing FPGA-based Accelerator Design for Deep.pdf", en *ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays (FPGA)*, 2015. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2684746.2689060> ↑ 65

Mateo Guerra-Londono

Estudiante del Departamento de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones del Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. Actualmente es Joven Investigador e Innovador ITM y pertenece al grupo de investigación en Automática Electrónica y Ciencias Computacionales en la misma institución universitaria. Mateo ha adquirido experiencia en el desarrollo de sistemas sobre arquitecturas heterogéneas basadas en FPGA para la aceleración de algoritmos de DSP y en programación sobre herramientas para síntesis de alto nivel.

Luis Castano-Londono

Ingeniero Electrónico y Magíster en Ingeniería-Automatización Industrial de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Actualmente es candidato a Doctor en Ingeniería - Automática en la misma universidad. Se desempeña como docente del Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería del Instituto Tecnológico Metropolitano e investigador del Grupo Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales. Su área de actuación es el diseño digital, particularmente el diseño de sistemas embebidos y sistemas heterogéneos basados en FPGA.

David Marquez-Viloria

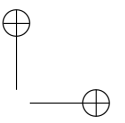
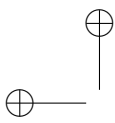
Ingeniero Electrónico de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, con énfasis en Control y Procesamiento Digital de Señales. Es Magíster en Ingeniería Electrónica de la Universidad de Puerto Rico campus Mayagüez, con énfasis en Procesamiento Digital de Señales donde adquirió experiencia en aceleración de algoritmos de DSP sobre estructuras de hardware reconfigurables. Cuenta con más de cinco años de experiencia docente y de investigación en temas relacionados a DSP, diseño digital y sistemas embebidos. Actualmente, David es candidato a Doctor en Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, es docente del ITM y pertenece al grupo de investigación en Automática Electrónica y Ciencias Computacionales del ITM.

Cristian Alzate-Anzola

Ingeniero Electrónico del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), Medellín, Colombia. Estudiante de la Maestría en Control y Automatización Industrial en el ITM. Pertenecer al grupo de investigación en Automática Electrónica y Ciencias Computacionales en la misma institución universitaria. Su área de actuación es el diseño digital, particularmente el diseño de sistemas embebidos y sistemas heterogéneos basados en FPGA.

Ricardo Velasquez-Velez

Ingeniero calificado en las áreas de Ingeniería Electrónica y Ciencias de la Computación, con experiencia en investigación a nivel nacional en la Universidad de Antioquia y el Instituto Tecnológico Metropolitano. A nivel internacional ha participado en diferentes grupos de investigación de Alemania, Francia y Suiza. Su trabajo en estos grupos ha sido realizado en las áreas de diseño de sistemas embebidos, modelos de programación paralelos y arquitectura de computadores. Ricardo tiene un doctorado en Informática de la Universidad de Rennes 1, y una Maestría en Diseño de Sistemas Embebidos de la Universidad de la Suiza Italiana. Actualmente Ricardo es profesor asociado en la Universidad de Antioquia.



Research

REVISTA
Ingeniería

Evaluation of Extracts Obtained from Fruit Wastes Using Different Methods

Evaluación de extractos de residuos de frutas utilizando diferentes métodos

Ciliana Flórez Montes¹, **Andrés Felipe Rojas-González**¹, **Sneyder Rodríguez-Barona**¹

¹Chemical Engineering Department, Engineering and Architecture Faculty, National University of Colombia, (Manizales-Colombia).

correspondence email: cflorezm@unal.edu.co

Recibido: 16/06/2020. Modificado: 02/09/2020. Aceptado: 21/11/2020.

Abstract

Context: Currently, the increase in agroindustrial waste generation has encouraged the search for viable use alternatives. In this paper, four methods to obtain extracts from mango, soursop, and grape peels, as well as and grape seeds, are studied. Their efficiency is analyzed through extraction yields and antioxidant capacity characterization of the extracts.

Method: The extraction was performed using solvent, Soxhlet, microwave-assisted, and ultrasound assisted extraction. The characterization of the extracts was made by total phenolic compounds and flavonoids quantification, as well as antioxidant capacity determination, using the DPPH, FRAP, and ORAC tests.

Results: It was found that grape seed extracts obtained by different extraction methods, highlighting those obtained by microwave assisted extraction, present a high total content phenolic compounds ($>321.381,41 \pm 3.476,85 \mu\text{g Gallic Acid/g}$) and flavonoids ($>103.232,01 \pm 4.638,19 \mu\text{g Quercetin/g}$), in addition to high antioxidant activity, according to the results of the DPPH ($<1,06 \pm 0,01$), FRAP ($>152.280,08 \pm 5.197,53 \mu\text{g TROLOX/g}$), and ORAC ($>124.566,81 \pm 581,96 \mu\text{g TROLOX/g}$) tests.

Conclusions: The results presented in this study suggest that the extracts obtained from grape seeds, especially those obtained by means of microwave-assisted extraction, have a potential use in food and pharmaceutical industries, due to their high antioxidant capacity and their total phenolic compounds and flavonoids content.

Keywords: antioxidant activity, conventional extraction, fruit wastes, non-conventional extraction

Language: English

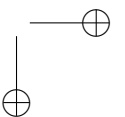
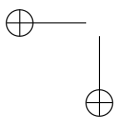
Open access



Flórez, C., Rojas, A.F., Rodríguez-Barona, S.: Evaluation of Extracts Obtained from Fruit Wastes Using Different Methods. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 1, pp. 77-92 (2021).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

<https://doi.org/10.14483/23448393.16525>



Resumen

Contexto: En la actualidad, el aumento en la generación de residuos agroindustriales ha incentivado la búsqueda de alternativas viables de aprovechamiento. En este artículo se estudian cuatro métodos para la obtención de extractos a partir de cáscaras mango, guanábana y uva, y semillas de uva. Se analiza su eficiencia a través de los rendimientos de extracción y la caracterización de la capacidad antioxidante de los extractos.

Método: La extracción se realizó mediante extracción con solvente, extracción Soxhlet, extracción asistida por microondas y extracción asistida por ultrasonido. La caracterización de los extractos se realizó mediante la cuantificación de compuestos fenólicos y flavonoides totales, así como la determinación de la capacidad antioxidante, utilizando las pruebas DPPH, FRAP y ORAC.

Resultados: Se encontró que los extractos de semilla de uva obtenidos por diferentes métodos de extracción, destacando los obtenidos por extracción asistida por microondas, presentan alto contenido de compuestos fenólicos totales ($>321.381,41 \pm 3.476,85 \mu\text{g Ácido Gálico/g}$) y flavonoides ($>103.232,01 \pm 4.638,19 \mu\text{g Quercetina/g}$), además de una alta actividad antioxidante, según los resultados de las pruebas de DPPH ($<1,06 \pm 0,01$), FRAP ($>152.280,08 \pm 5.197,53 \mu\text{g TROLOX/g}$) y ORAC ($>124.566,81 \pm 581,96 \mu\text{g TROLOX/g}$).

Conclusiones: Los resultados presentados en este estudio sugieren que los extractos obtenidos de las semillas de uva, especialmente aquellos obtenidos mediante extracción asistida por microondas, tienen un uso potencial en la industria alimentaria y farmacéutica, debido a su alta capacidad antioxidante y su contenido de compuestos fenólicos totales y flavonoides.

Palabras clave: capacidad antioxidante, extracción convencional, residuos de frutas, extracción no convencional

Idioma: Inglés

1. Introduction

Due to population growth and the need to improve living standards, the intensification of agricultural production and agroindustrial processes have caused an increase in waste volume [1]. Specifically, in the department of Caldas, a wide variety of agricultural products are generated, and some companies located in the department that process different fruits to produce fruit pulps, confectionery products, ice cream and dehydrated fruits, generate waste such as peels, seeds, stems, and stalks. This type of waste has a negative impact on the environment due to its high concentration of organic matter and its inappropriate final disposal [1]. Therefore, the interest in the use of agroindustrial waste has increased to mitigate environmental impacts, give added value to waste, and improve regional economies.

Mango, soursop, and grape peels, in addition to grape seeds, are some of the waste generated in the agroindustry of Caldas. These wastes have valuable compounds with antioxidant properties in their structure, which could be used as food ingredients, due to their benefits to human health [2]. The extraction of these compounds represents a viable and innovative alternative for the use of waste and for the development of regional industries, given that most of the waste of this type is used for the generation of energy or the production of concentrates for animals [1]. Valuable compounds could be extracted through conventional techniques, for example, through solvent, Soxhlet, and mechanical extraction [3]; and non-conventional techniques such as supercritical fluids extraction

(SFE), ultrasound-assisted extraction (UAE), and microwave-assisted extraction (MAE) [4]. Conventional extraction techniques have several disadvantages, since they consume too much time, are arduous, and have less selectivity and poor yield. They also use organic solvents that could be toxic. The basis of these techniques is basically the extraction power of the solvent and the heat applied or its combination [4].

Several authors have reported valuable compounds extraction using different techniques. Extraction yields of 60,00 % were reported for grape peel using soxhlet extraction [5], and extraction yields between 29,00 and 34,00 % in solvent extraction of mango peel compounds was obtained [6]. Some authors found yields around 2,00 % in the MAE of compounds from grape wastes, [7], [8]. On the other hand, the UAE of compounds from the soursop peel has an approximate yield of 15,00 % [9]. The results obtained previously in other studies are an indication of the potential of mango, soursop, and grape peels, as well as grape seeds, to be used to obtain valuable compounds with high added value.

Bioactive compound quantification and antioxidant capacity determination are carried out by spectrophotometric or colorimetric methods [10]. Some of the most used methods are the quantification of total phenolic compounds and flavonoids [11], ferric reducing antioxidant power (FRAP) determination [10], the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) assay, the 2,2'-azinobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonic acid) (ABTS) assay, and oxygen radical absorption capacity (ORAC) determination [12]. The different antioxidant capacity assays are divided into hydrogen atom transfer (HAT) and single electron transfer (ET) reaction-based assays [10].

The aim of this article is to obtain extracts from four fruit wastes (mango peel, soursop peel, grape peel, and grape seed) using solvent extraction, Soxhlet extraction, microwave-assisted extraction, and ultrasound-assisted extraction. Also, the antioxidant capacity of the extracts was evaluated by determining total phenolic compounds and flavonoids, as well as performing DPPH, FRAP, and ORAC tests.

2. Methodology

2.1. Waste obtaining and pretreatment

Mango peel (MP), soursop peel (SP), grape peel (GP), and grape seeds (GS) were selected considering their antioxidant capacity, which was previously reported in the literature. The wastes were obtained from the industry in Manizales, Colombia. Fruit wastes were classified and sanitized for subsequent dehydration. These were cut manually to reduce size and dried at 45 °C in a Terrigeno brand muffle until constant weight. Once dry, the wastes were ground in a disk mill until a particle size of 1 mm or less was reached.

2.2. Solvent extraction (SOL)

The dried wastes were placed in a container with ethanol 60 % in a 1:20 solid-liquid ratio. The procedure was carried out for 8 hours at a temperature of 25 °C and with stirring of 65 rpm [13].

Subsequently, the liquid fraction was separated from the solid fraction by vacuum filtration and subjected to rotaevaporation at 40 °C and 180 mbar in order to recover the solvent and concentrate the obtained extracts.

2.3. Soxhlet extraction (SOX)

The dried sample of the wastes was deposited in filter paper cartridges and placed on the Soxhlet equipment. The extraction was carried out for 8 hours, using ethanol at 60 % with a 1:25 solid-liquid ratio [14]. The liquid fraction obtained was subjected to rotaevaporation at 40 °C and 180 mbar to recover the solvent and concentrate the extracts obtained.

2.4. Microwave-assisted extraction (MAE)

The dried wastes were deposited in a container with ethanol at 60 % in a 1:10 solid-liquid ratio. For this procedure, a 2² factorial experimental design was used, in which the power and extraction time were selected as factors. Both factors had two levels, 700 W and 420 W for power and 1 and 3 min for time [15]. Subsequently, the liquid fraction was separated from the solid fraction by vacuum filtration and subjected to rotaevaporation at 40 °C and 180 mbar to recover the solvent and concentrate the obtained extracts.

2.5. Ultrasound-assisted extraction (UAE)

Wastes were deposited in a container with ethanol at 60 % in a 1:20 solid-liquid ratio. The procedure was carried out for 1 hour at a constant temperature of 50 °C and a power of 50 W [13]. Subsequently, the liquid fraction was separated from the solid fraction by vacuum filtration and subjected to rotaevaporation at 40 °C and 180 mbar to recover the solvent and concentrate the obtained extracts.

2.6. Calculation of extraction yield

The extracts were weighed, and the crude extraction yield (EY) was calculated according to Eq. (1):

$$EY = [M_E M_W] * 100 \% \quad (1)$$

where M_E is the extract mass (g) and M_W is the waste mass (g).

2.7. Extract characterization

The characterization of the obtained extracts was carried out by quantifying the total phenolic compounds and flavonoids, as well as determining the antioxidant capacity with the DPPH, FRAP, and ORAC methods.

2.7.1. Total phenolic compound determination

The total phenolic compounds were determined following the methodology described in [16]. During the analysis, 60 µL of the sample were added to an assay tube that contained 4,75 mL

of distilled water. 300 μL of FolinCiocalteu 1 N were added, homogenized, and allowed to react for 8 minutes. After this time elapsed, 900 μL of Na_2CO_3 20 % were added and allowed to react for 2 hours. The absorbance was measured at 765 nm. A pattern of gallic acid (GA) was made, and distilled water was the photometric target. To this effect, the testing Spectroquant® Prove 300 spectrophotometer was utilized. The result was expressed as milligram equivalents of GA per gram of sample on a dry basis.

2.7.2. Flavonoid determination

Flavonoids were determined according to the methodology described in [11], with some modifications. For this test, 20 μL of the sample were taken, and 115 μL of water and 7,5 μL of NaNO_2 5 % were added, homogenized, and allowed to react for 5 minutes. Then, 30 μL of AlCl_3 2,5 % were added, homogenized, and allowed to react for 6 minutes. Finally, 50 μL of NaOH 1M and 50 μL of water were added, homogenized, and the absorbance was measured at 500 nm 5 minutes later. A pattern of quercetin was made, and the photometric blank was distilled water. This test was performed with a Multiskan GO UV/Vis Thermo Scientific microplate spectrophotometer. The result of this test was expressed in equivalent micrograms of quercetin per gram of dry-based sample.

2.7.3. Antioxidant activity determination

To determine the antioxidant capacity, the methodology proposed by [14] was used. According to this methodology, 5 dilutions of the sample were made, 150 μL of the dilution were taken and added to an assay tube that contained 3 mL of 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) 6×10^{-5} M. The solution was stirred using a vortex for 30 seconds. Subsequently, the sample was stored in a dark place for 1 hour. Finally, the absorbance was recorded at 515 nm. For this test, a Spectroquant® Prove 300 spectrophotometer was utilized. The inhibition percentage was determined using Eq. (2), and the dilutions with values between 20 and 80 % were taken to construct a graph of inhibition against concentration. From this graph, the equation to calculate the IC_{50} was found, which refers to the concentration of sample necessary to obtain a 50 % inhibition of free radicals with DPPH.

$$\%Inh = [1 - Abs_{Dln} / Abs_{BT}] * 100 \% \quad (2)$$

where *Inh* is Inhibition, Abs_{Dln} is the dilution absorbance, and Abs_{BT} is the blank test absorbance.

2.7.4. Ferric reducing antioxidant potential determination (FRAP)

The ferric reducing antioxidant potential was determined following the methodology described in [17]. For FRAP measurement, the FRAP reagent was prepared, which consists of a mixture of acetate buffer 300 mM, TPTZ 10 mM, and FeCl_3 20 mM in a 10:1:1 ratio. First, 150 μL of the FRAP reagent were taken and incubated for one minute at 37 °C. They were then homogenized, and absorbance was measured at 600 nm. Subsequently, 20 μL of the sample were added, homogenized, and allowed to react for 8 minutes. Finally, absorbance at 600 nm was again measured. TROLOX was the standard substance, and the photometric blank was distilled water. For this test, a Multiskan GO UV/Vis Thermo Scientific microplate spectrophotometer was utilized. The result was expressed as equivalent micrograms of TROLOX per gram of dry-based sample.

2.7.5. Oxygen radical absorbance capacity determination (ORAC)

Oxygen radical absorbance capacity was determined according to the methodology described in [18]. For ORAC determination, 20 μL of the sample were taken, and 120 μL of fluorescein 120 nM are added and incubated for 15 minutes at 37 °C in the absence of light. Subsequently, 60 μL of AAPH 40 mM were added, and the fluorescein intensity was read every minute for 2 hours using 538 and 485 nm emission and excitation filters. For this analysis, TROLOX was used as the reference substance. The photometric target and positive control of the test was a phosphate buffer. This test was performed with a Fluoroskan Ascent Thermo Scientific microplate fluorimeter. The result was expressed as equivalent micrograms of TROLOX per gram of dry-based sample.

2.8. Statistical analysis

All analyses conducted in this study were performed in triplicate, and the values reported are presented as average values, along with their standard deviations. For the statistical analysis, the t-test was performed to identify whether the results obtained by every extraction method were significantly different. Solvent extraction was taken as the base case, so that the results obtained for the wastes by means of different extraction methods were compared with the results obtained by solvent extraction. $p < 0,05$ was defined for significantly different data, and $p < 0,01$ for significantly very different data. Statistical analysis was performed using Microsoft Excel®.

3. Results and discussion

3.1. Solvent extraction

Table I presents the extraction yield obtained using solvent (SOL) and soxhlet (SOX) extraction. In SOL, the wastes with a highest content of extracts were grape peel (GP) and soursop peel (SP), with an extraction yield of 61,89 and 44,61 %, respectively. According to literature reports, the SOL yields for mango peel (MP) are between 29,00 and 34,00 % [6], while the yield for grape seed (GS) is approximately 10,40 % [19]. It was observed that the results obtained in this study (38,66 % for MP and 12,72 % for GS) are slightly higher compared to those reported in the literature. This is due to the extraction times used in previous studies [6], [19].

3.2. Soxhlet extraction

In Table I, it is possible to observe that GP (64,65 %) and MP (52,28 %) present the highest content of extracts. Likewise, the yield through SOX extraction has significant differences in the case of GP and very significant differences for MP, SP, and GS, with respect to the extraction yield obtained through SOL extraction, which can be identified with asterisks presented in the Table and were obtained through statistical analysis.

In the literature, SOX extraction yield of GP is approximately 60,00 % [5], a value close to that obtained by this study (64,65 %). However, in the case of SP, values from 0,23 to 16,50 % are reported [20], showing a significant difference with the ones found in this work (50,63 %). This is possibly due to the use of other solvents, for example, methanol, hexane, or ethyl acetate, as well

as the extraction temperature (room temperature) [20].

The differences obtained between the extraction yields with the SOX and SOL methods are mainly due to the fact that, in SOX extraction, waste is in contact with the pure solvent, while it is not recovered in SOL extraction, so it could become saturated [3]. Considering this, the performance of SOX extraction is expected to be higher.

3.3. Microwave-assisted extraction

Table I also presents the extraction yield obtained using microwave-assisted extraction (MAE). It is possible to observe that GP yields the highest content of extracts when powers of 700 W and 420 W and 3 minutes of extraction are used, with an EY of 65,35 and 62,18 %, respectively. According to previous studies, MAE has obtained yields of around 2,00 % for grape wastes [7], [8], values much lower than those obtained in the present study, which vary between 15,08 and 65,35 % for GS and GP. This information suggests that the selected operating conditions optimize the extraction process.

Table I also shows that, when the extraction time is set, if a higher power is used, higher extraction yields are obtained. On the other hand, if the extraction process power is set, increasing the time also increases the extracted compound yields, except for MAE, with a power of 420 W for the MP case. Therefore, it can be concluded that the use of higher potential and longer extraction times positively influences the performance of the MAE process.

Similarly, it is observed that the extraction yield of MP by MAE (47,97-53,82 %) has very significant differences compared to SOL extraction (38,66 %). In the case of SP, only very significant differences are observed in MAE, with operating conditions of 420 W and 1 minute (26,85 for MAE and 44,61 for SOL). The extracts from GP show significant differences with respect to SOL extraction (61,89 %) when MAE is used at a power of 700 W and times of 1 and 3 minutes (65,35 and 59,02 %), while, if a power of 420 W is used for 1 minute (45,96 %), the differences are very significant. When GS is used to obtain extracts, it is observed that the yields obtained from these by MAE for 3 minutes (16,40 and 16,12 %) present significant differences compared to SOL extraction (12,72 %). Meanwhile, if the extraction is performed for 1 minute, no significant differences are reported.

3.4. Ultrasound-assisted extraction

Table I presents the extraction yield obtained using ultrasound assisted extraction (UAE). Wastes such as MP (53,53 %) and GP (61,29) yield a higher percentage of extracts compared to GS (13,93 %). According to a previous study [21], the yield of UAE for MP is 14,30 %, a value that differs considerably from the results obtained in this work (53,53 %). This is because the temperature used in the study was room temperature [21]. Similarly, a yield of 15,74 % for SP was reported using operating conditions of 5 minutes and 25 °C [9]. This value is lower than the one obtained in this study (39,56 %). These data indicate that, at a higher temperature (50°C) and extraction time (1 h), it is possible to obtain better yields through UAE.

Table I. Extracts obtained by the different methods

Extraction method	Conditions	Waste	Extraction yield [%]
Solvent	25 °C 8h	MP	38,66 ± 0,74
		SP	44,61 ± 1,05
		GP	61,89 ± 0,72
		GS	12,72 ± 0,37
Soxhlet	8 h	MP	52,28 ± 1,28**
		SP	50,63 ± 0,87**
		GP	64,65 ± 0,52*
		GS	18,45 ± 0,53**
Microwave assisted	700 W 3 min	MP	53,82 ± 1,76**
		SP	46,51 ± 1,68
		GP	65,35 ± 1,43*
		GS	16,40 ± 0,06*
	700 W 1 min	MP	52,50 ± 0,38**
		SP	45,18 ± 2,68
		GP	59,02 ± 0,24*
		GS	15,62 ± 0,16
	420 W 3 min	MP	47,97 ± 0,65**
		SP	42,56 ± 0,71
		GP	62,18 ± 2,85
		GS	16,12 ± 0,07*
420 W 1 min	MP	50,12 ± 1,04**	
	SP	26,85 ± 0,58**	
	GP	45,96 ± 0,77**	
	GS	15,08 ± 0,10	
Ultrasound assisted	50 °C 50 W 1 h	MP	53,53 ± 1,18**
		SP	39,56 ± 0,54**
		GP	61,29 ± 1,01
		GS	13,93 ± 0,55

*: p<0,05; **: p<0,01

When the results obtained by the two non-conventional techniques are compared, slightly more favorable values are observed in the case of MAE at 700 W and 3 min, with 17 % higher values for SP and GS. This may be due to the high lignin content present in the waste used for extraction, which has the function of giving resistance to the cell wall [22]. Considering the principle of acoustic cavitation that is applied in UAE, it could be suggested that the bubbles formed would not cause an easy rupture of the cell wall that allows a better diffusion of the solvent, and therefore a greater extraction yield [23].

Considering the consumption of time and energy of every extraction method, the time used in conventional extractions is significantly greater than the time required by non-conventional methods to obtain close extraction yields. This demonstrates that non-conventional extraction techniques represent a viable alternative to obtain valuable compounds, since operating times are noticeably shorter,

which could be related to increased production. The energy consumption in non-conventional techniques is much lower, which translates into lower costs and, similarly, less environmental impact. On the other hand, it is important to highlight the use of ethanol as a solvent, as well as its possibility of recovery, which, in turn, translates into lower costs for the acquisition of raw materials, in addition to generating a low environmental impact by not disposing of organic solvents, characterized by negative impacts on the environment [24].

3.5. Extract characterization

Table II shows the results obtained for the total phenolic compounds (TPC) of the extracts, with values from $62.915,99 \pm 889,91 \mu\text{g GA/g}$ for MP extracts to $700.936,84 \pm 5.564,79 \mu\text{g GA/g}$ for GS extracts. In general, it is observed that the TPC contents of the extracts obtained by the different techniques for each of the wastes show significant differences with respect to the extracts obtained by solvent extraction, with 32 and 64 % higher values for MP and GP extracts, respectively. On the other hand, when the extracts obtained by different methods were analyzed, it was found that there is no relationship between the extraction method and the TPC content of the extract. However, in the case of grape waste extracts, better results were found through MAE and SOX extraction.

According to the results reported in the literature, the TPC values for GP extracts can vary from 5.000,00 to 48.600,00 $\mu\text{g GA/g}$ with different extraction methods [25]. Previous studies also report TPC values between 3.512,00 and 5.617,00 $\mu\text{g GA/g}$ for MP extracts [26]. When comparing data found in the literature with the results obtained in this study, it is observed that they differ in an order of magnitude ($62.915,99 \pm 889,91$ to $147.193,63 \pm 1.643,39 \mu\text{g GA/g}$ for MP extracts and $268.546,27 \pm 9.779,74$ to $613.037,87 \pm 1.885,09$ for GP extracts), which may be due to the concentration of the solvent, the time, and the extraction temperature, which are determining factors in extraction performance.

Table II also shows the results obtained from flavonoids for the extracts. Asterisks mark the significant (*) and very significant (**) differences in the flavonoid content of each extract obtained through the different methods with respect to solvent extraction. In general, GP and MP show significant differences, whereas for GS and SP, the differences between the results are not significant. On the other hand, according to the results presented in the literature, the GS extracts obtained by SOL extraction have a flavonoid content of 6.398,00 $\mu\text{g Quercetin/g}$ [27], while the SP extracts obtained with SOX extraction present a flavonoid content of 36.100,00 $\mu\text{g Quercetin/g}$ [20]. The differences between the results reported in the literature and those found in the present study ($207.832,52 \pm 13.996,46 \mu\text{g Quercetin/g}$ for GS extracts and $17.198,74 \pm 780,13 \mu\text{g Quercetin/g}$ for SP extracts) are due to the different operating conditions and the use of solvents other than ethanol.

Likewise, it is observed that the higher flavonoid content corresponds to the extracts obtained from GS ($103.232,01 \pm 4.638,19$ to $270.954,93 \pm 10.582,09 \mu\text{g Quercetin/g}$), followed by the extracts obtained from MP ($62.674,99 \pm 1.547,61$ to $147.483,54 \pm 4.269,63 \mu\text{g Quercetin/g}$). A daily quercetin intake of approximately 50 mg has anti-inflammatory and antioxidant effects [28]. Therefore, MP and GS extracts, could supply of the recommended daily amount of quercetin. Consequently, these extracts could be used as food additives or dietary supplements [29].

Table II. Total phenolic compounds and flavonoids in the extracts

Method	TPC [$\mu\text{g GA/g}$]	Flavonoids [$\mu\text{g Quercetin/g}$]
MP SOX	147.193,63 \pm 1.643,39**	147.483,54 \pm 4.269,63*
MP SOL	111.120,65 \pm 1.112,96	111.820,59 \pm 5.438,03
MP M700-3	86.595,18 \pm 855,74**	85.431,69 \pm 4.110,64*
MP M700-1	126.169,67 \pm 1.266,06**	124.054,56 \pm 2.376,74*
MP M420-3	145.541,26 \pm 621,14**	142.485,21 \pm 5.872,08*
MP M420-1	62.915,99 \pm 889,91**	62.674,99 \pm 1.547,61**
MP UAE	139.940,09 \pm 2.542,73*	123.926,89 \pm 1.942,57
SP SOX	269.015,53 \pm 926,25**	17.198,74 \pm 780,13
SP SOL	355.419,40 \pm 8.092,43	20.314,46 \pm 579,93
SP M700-3	137.268,52 \pm 1.266,57**	22.410,37 \pm 769,94
SP M700-1	126.134,26 \pm 1.300,19**	21.068,22 \pm 832,49
SP M420-3	196.416,13 \pm 4.713,81**	33.039,75 \pm 2.039,08*
SP M420-1	68.901,15 \pm 754,04**	11.912,81 \pm 236,20**
SP UAE	151.057,28 \pm 3.911,89*	23.016,83 \pm 1.358,45
GP SOX	613.037,87 \pm 1.885,09**	39.787,67 \pm 1.833,13*
GP SOL	373.978,77 \pm 18.850,94	51.831,11 \pm 880,61
GP M700-3	494.441,06 \pm 1.717,77*	31.404,00 \pm 699,93**
GP M700-1	556.535,97 \pm 1.983,51**	36.574,89 \pm 2.260,79**
GP M420-3	384.483,95 \pm 2.224,78	24.765,14 \pm 1.253,72**
GP M420-1	281.706,16 \pm 4.150,73*	16.712,21 \pm 499,66**
GP UAE	268.546,27 \pm 9.779,74	22.323,72 \pm 283,92**
GS SOX	700.936,84 \pm 5.564,79	246.527,30 \pm 11.729,74
GS SOL	622.591,25 \pm 3.579,55	207.832,52 \pm 13.996,46
GS M700-3	436.124,74 \pm 1.885,09**	169.230,74 \pm 6.553,75
GS M700-1	321.381,41 \pm 3.476,85**	103.232,01 \pm 4.638,19**
GS M420-3	669.390,00 \pm 2.525,35**	225.661,61 \pm 5.273,43
GS M420-1	470.132,10 \pm 1.246,87**	154.329,72 \pm 5.932,83
GS UAE	291.277,55 \pm 1.564,76*	270.954,93 \pm 10.582,09

*: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$

The results obtained in the determination of the antioxidant capacity are presented in Table III. In general, it is observed that the antioxidant capacity (IC 50, FRAP and, ORAC) of the extracts obtained by each of the methods presents significant differences with respect to the results obtained through SOL. In the case of the antioxidant activity (IC 50 results), the values could be 55 and 36 % higher for MP and SP extracts, respectively, compared to the results obtained through solvent extraction. In the FRAP test, the results may differ in percentages of 37 and 62 % for the extracts of MP and GS, compared to the values obtained for the extracts obtained with SOL. Likewise, differences of greater than 85 % were found for the extracts of each waste, according to the results of the ORAC test. This can be seen in Table III, where * corresponds to a significant difference and ** is a very significant difference.

Table III shows that the extracts obtained from GS ($1,00 \pm 0,01$ to $1,14 \pm 0,01$) and GP ($1,83 \pm 0,01$ to $6,77 \pm 0,08$) have a greater inhibitory capacity expressed in terms of inhibitory concentration (IC 50), while the extracts obtained from SP ($19,21 \pm 0,56$ to $30,28 \pm 0,49$) and MP ($10,48 \pm 0,43$ to $23,37 \pm 0,09$) have the lowest inhibitory capacity. A literature study reports an IC 50 value of 1.180,00 for SP extract obtained through conventional extraction [30]. This value is higher than the one found in this work ($30,28 \pm 0,49$), which is due to the extraction time of 1 hour and the use of pure ethanol as a solvent. On the other hand, an IC 50 value of 2,44 is reported for the GS extract, which does not differ greatly with the values obtained in this study ($1,00 \pm 0,01$ to $1,14 \pm 0,01$).

In the case of the ferric reducing antioxidant potential (FRAP), it is observed that the extracts obtained from GS have the best results, highlighting those obtained by MAE ($152.280,08 \pm 5.197,53$ to $181.331,54 \pm 1.292,64$ $\mu\text{g TROLOX/g}$). In previous studies, it has been found that the extracts of grape waste can reach FRAP values of $132.653,70$ $\mu\text{g TROLOX/g}$ [31], values close to those obtained in this study for GS (between $152.280,08 \pm 5.197,53$ and $181.331,54 \pm 1.292,64$ $\mu\text{g TROLOX/g}$). On the other hand, it is observed that GS, GP, SP, and MP extracts present a greater FRAP value compared to raspberry and blackberry, which have a FRAP value of $9.828,89$ and $9.999,09$ $\mu\text{g TROLOX/g}$, respectively, and stand out for having a high antioxidant capacity [32].

Similarly, in this Table shows that the results obtained for oxygen radicals absorbance capacity (ORAC) range from $4.429,21 \pm 32,68$ $\mu\text{g TROLOX/g}$ for SP extracts obtained by MAE at 700 W for 3 minutes, up to $756.094,60 \pm 1.002,33$ $\mu\text{g TROLOX/g}$ for GS extract obtained by MAE at 700 W for 3 minutes. When comparing the results obtained with data reported in the literature for GP extracts, it is observed that ORAC values found in the present study are up to 12 times higher. In the case of MAE using methanol 60 % as a solvent, an ORAC value of $31.982,06$ $\mu\text{g TROLOX/g}$ [33] was reported, whereas for SOL, a value of $68.204,03$ $\mu\text{g TROLOX/g}$ was found [25]. This indicates that the operating conditions used in the extraction significantly affect the antioxidant capacity of the extracts.

In the daily diet, it is recommended to consume foods that provide an ORAC value greater than $2.502.900$ μg of TROLOX [34]. According to this information, the extracts obtained from wastes can contribute an important percentage of these requirements, as is the case of the GS extracts obtained by microwave-assisted extraction at 700 W and 3 minutes ($756.094,60 \pm 1.002,33$ μg of TROLOX), which can supply 30 % of the antioxidants recommended for daily intake with 1 g of

Table III. Antioxidant capacity of extracts

Method	IC50	FRAP [$\mu\text{g TROLOX/g}$]	ORAC [$\mu\text{g TROLOX/g}$]
MP SOX	21,14 \pm 0,08**	109.573,31 \pm 2.829,32**	607.741,88 \pm 31.622,11
MP SOL	23,37 \pm 0,09	91.391,63 \pm 2.017,21	596.853,03 \pm 1.968,66
MP M700-3	20,74 \pm 0,23**	72.773,95 \pm 1.950,52*	79.664,22 \pm 528,23**
MP M700-1	20,22 \pm 0,14**	60.934,57 \pm 2.688,25**	60.835,67 \pm 255,77**
MP M420-3	20,92 \pm 0,12**	57.388,13 \pm 1.607,64**	176.766,53 \pm 980,33**
MP M420-1	20,48 \pm 0,01**	66.558,70 \pm 1.600,01**	194.937,72 \pm 1.023,83**
MP UAE	10,48 \pm 0,43**	84.195,38 \pm 1.046,73*	160.388,21 \pm 442,82**
SP SOX	26,56 \pm 0,05*	76.340,75 \pm 3.620,05**	15.849,36 \pm 48,29**
SP SOL	30,28 \pm 0,49	120.280,83 \pm 2.629,18	638.840,77 \pm 2.077,63
SP M700-3	25,65 \pm 0,35*	116.998,10 \pm 3.832,97*	4.429,21 \pm 32,68**
SP M700-1	27,23 \pm 0,23*	103.748,95 \pm 2.597,18*	11.248,93 \pm 55,66**
SP M420-3	26,34 \pm 0,08*	127.828,11 \pm 993,47*	51.937,50 \pm 250,91**
SP M420-1	25,51 \pm 0,07*	89.956,15 \pm 2.899,19*	454.416,72 \pm 1.962,09*
SP UAE	19,21 \pm 0,56**	91.500,15 \pm 3.424,06*	36.535,31 \pm 156,60**
GP SOX	2,15 \pm 0,01*	45.254,17 \pm 814,16**	158.034,18 \pm 417,13**
GP SOL	2,23 \pm 0,01	33.208,97 \pm 389,54	95.463,49 \pm 244,33
GP M700-3	1,92 \pm 0,01**	31.453,25 \pm 1.073,72	180.532,45 \pm 818,58**
GP M700-1	1,90 \pm 0,01**	32.250,23 \pm 973,52	400.151,65 \pm 2.006,49**
GP M420-3	1,90 \pm 0,02**	26.321,56 \pm 344,13**	134.880,93 \pm 840,99*
GP M420-1	1,83 \pm 0,01**	22.427,89 \pm 286,85**	270.431,50 \pm 1.174,70**
GP UAE	6,77 \pm 0,08**	41.118,45 \pm 1.230,51*	137.871,37 \pm 642,90**
GS SOX	1,10 \pm 0,01	146.597,12 \pm 4.223,36*	248.462,09 \pm 1.990,96**
GS SOL	1,14 \pm 0,01	111.656,79 \pm 721,40	447.823,12 \pm 569,93
GS M700-3	1,06 \pm 0,01*	175.835,57 \pm 2.798,28**	756.094,60 \pm 1.002,33**
GS M700-1	1,00 \pm 0,01*	172.721,78 \pm 414,45**	607.455,46 \pm 2.716,77*
GS M420-3	1,02 \pm 0,01*	181.331,54 \pm 1.292,64**	124.566,81 \pm 581,96**
GS M420-1	1,00 \pm 0,01*	152.280,08 \pm 5.197,53*	701.047,14 \pm 3.028,81**
GS UAE	1,53 \pm 0,05**	151.350,86 \pm 1.704,15**	237.008,67 \pm 363,09**

*: p<0,05; **: p<0,01

the extract. Therefore, these extracts could be a potential source of valuable compounds with the ability to inhibit lipid oxidation reactions [10].

According to the results, it is observed that GS extracts present the highest content of phenolic compounds ($291.277,55 \pm 1.5647,58$ to $700.936,84 \pm 5.564,79$ $\mu\text{g GA/g}$) and a better antioxidant capacity, regardless of the way in which the extracts were obtained. Previous studies have reported the presence of compounds, for example, gallic acid, catechin, epicatechin, and proanthocyanidins in GS. These compounds contribute to the high antioxidant capacity of this waste [35], [36]. Considering the antioxidant capacity of GS extracts, the valuable compounds present in them would be expected to be good electron donors and can inhibit the $\text{Fe}^3/\text{Ferricyanide}$ complex, which is reflected in the high values of the FRAP test ($111.656,79 \pm 721,40$ to $181.331,54 \pm 1.292,64$ $\mu\text{g TROLOX/g}$) [37]. The results obtained in the ORAC test ($124.566,81 \pm 581,96$ to $756.094,60 \pm 1.002,33$ $\mu\text{g TROLOX/g}$) indicate that GS extracts contain compounds capable of trapping the peroxyl radical, which is relevant in the oxidation of lipids in food [10].

Considering the presence of antioxidant compounds in GS, this waste becomes a raw material of great interest in the food industry due to its benefits to human health [29]. The use of extracts obtained from fruit waste as food ingredients is an interesting alternative for obtaining compounds with a high antioxidant capacity, since it represents the possibility of valorization of this type of waste, which not only brings economic benefits for the industry, but also avoids inappropriate disposal, thus reducing environmental impact [38]. On the other hand, microwave-assisted extraction is a viable method for obtaining valuable compounds, since, in short periods of time and with low energy requirements and water consumption, it is possible to obtain high yields from the bioactive compounds with antioxidant capacity. However, it is necessary to analyze the composition of the extracts and carry out toxicity tests in order to define their possible applications and guarantee their safety.

4. Conclusions

The results obtained in this study show that the extraction yields of conventional and non-conventional methods turn out to be significantly different. Grape peel was the waste with the highest extraction yields, followed by mango peel, soursop peel, and grape seed. Obtaining grape and mango peel extracts proved to have higher yields when microwave-assisted extraction was used (700 W and 3 min), while the highest yield was obtained with Soxhlet extraction in the case of soursop peel and grape seed.

In contrast, grape seed extracts presented the highest antioxidant capacity, followed by mango peel, grape peel, and soursop peel. Grape peel, soursop peel, and grape seed extracts presented higher antioxidant capacity when microwave-assisted extraction was used. As for mango peel, the best results were for the extracts obtained through Soxhlet extraction.

These results indicate that there is no relationship between the extraction method, its efficiency, and the quality of the extracts obtained. This is due to the composition of the wastes, which may present compounds in their structure whose extraction is facilitated by a specific technique. Howe-

ver, microwave-assisted extraction presented very good results for each waste, and, considering the short extraction times, it is the technique with the highest efficiency.

The results of this study give rise to future research in which the composition of the extracts obtained is analyzed, especially those obtained from grape seeds by microwave-assisted extraction, in order to identify different metabolites and their concentration, and similarly, carry out toxicity tests to guarantee the safety of the extracts, so that they can be used as food ingredients with a potential specific benefit.

References

- [1] L. V. Peñaranda, S. P. Montenegro, and P. A. Giraldo, "Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia", *Rev. Inv. Agr. Amb.*, vol. 8, no. 2, pp. 141–150, 2017. <https://doi.org/10.22490/21456453.2040> ↑78
- [2] F. Bosco, A. Casale, G. Gribaudo, C. Mollea, and G. Malucelli, "Nucleic Acids from Agro-Industrial Wastes: A Green Recovery Method for Fire Retardant Applications", *Ind. Crops Prod.*, vol. 108, pp. 208–218, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.035> ↑78
- [3] J. Viganó and J. Martínez, "Trends for the Application of Passion Fruit Industrial By-Products: A Review on the Chemical Composition and Extraction Techniques of Phytochemicals", *Food Pub. Health*, vol. 5, no. 5, pp. 164–173, 2015. <https://doi.org/10.5923/j.fph.20150505.03> ↑78, 83
- [4] N. A. Sagar, S. Pareek, S. Sharma, E. M. Yahia, and M. F. Lobo, "Fruit and Vegetable Waste: Bioactive Compounds, Their Extraction, and Possible Utilization", *Comp. Rev. F. Sci. F. Safe.*, vol. 17, pp. 512–531, 2018. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12330> ↑79
- [5] M. K. Hrnčič, D. Cör, P. Kotnik, and Ž. Knez, "Extracts of White and Red Grape Skin and Rosehip Fruit: Phenolic Compounds and Their Antioxidative Activity", *Acta Ch. Slov.*, vol. 66, pp. 751–761, 2019. <https://doi.org/10.17344/acsi.2019.5253> ↑79, 82
- [6] S. M. V. Palmeira, L. M. Gois, and L. D. Souza, "Extraction of Phenolic Compounds from Mango Peels", *Lat. Am. App. Res.*, vol. 42, pp. 77–81, 2012. ↑79, 82
- [7] M. Kaleem, A. Ahmad, T. Masud, and K. Raja, "Physico-Chemical Analysis and Optimization of Ultrasound Assisted Extraction of Phytochemicals from King's Ruby Grapes", *The Journal of Animal & Plant Sciences*, vol. 30, no. 1, pp. 205–211, 2020. <https://doi.org/10.36899/JAPS.2020.1.0023> ↑79, 83
- [8] V. Pezzini, F. Agostini, F. Smiderle, L. Touguinha, M. Salvador, and S. Moura, "Grape Juice By-Products Extracted by Ultrasound and Microwave-assisted with Different Solvents: A Rich Chemical Composition", *Food Sci. Biotech.*, vol. 28, pp. 691–699, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10068-018-0531-x> ↑79, 83
- [9] G. Aguilar-Hernández, M. de L. García-Magaña, M. de Á. Vivar-Vera, S. G. Sáyago-Ayerdi, J. A. Sánchez-Burgos, J. Morales-Castro, L. M. Anaya-Esparza, and E. Montalvo-González, "Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction of Phenolic Compounds from *Annona muricata* By-Products and Pulp", *Molecules*, vol. 904, no. 24, pp. 1–15, 2019. <https://doi.org/10.3390/molecules24050904> ↑79, 83
- [10] D. Grupta, "Methods for Determination of Antioxidant Capacity: A Review", *Int. J. Pharma. Sci. Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 546–566, 2015. [https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.6\(2\).546-66](https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.6(2).546-66) ↑79, 89
- [11] J. C. Camarena-Tello, H. E. Martínez-Flores, M. G. Garnica-Romo, J. S. Padilla-Ramírez, A. Saavedra-Molina, O. Alvarez-Cortes, M. C. Bar-tolomé-Camacho, and J. O. Roldes-López, "Scavenging Abilities with Leaf Extracts from Two Varieties of *Psidium Guajava* L.", *Antioxidants*, vol. 7, no. 34, pp. 2–12, 2018. <https://doi.org/10.3390/antiox7030034> ↑79, 81
- [12] A. Romulo, "The Principle of Some In vitro Antioxidant Activity Methods: Review", *IOP Conf. S.: Earth Env. Sci.*, vol. 426, pp. 1–7, 2020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/426/1/012177> ↑79
- [13] A. S. Caballero, *Evaluation of the Influence of Ultrasound and Supercritical Fluids in Processes of Polyphenolic Compounds Extraction from Agroindustrial Wastes*, M.Sc dissertation, Chemical Engineering Department, Nat. U. Col., Manizales, Caldas, 2017. ↑79, 80
- [14] Y. Poodi, M. Bimakr, A. Ganjloo, and S. Zarringhalami, "Intensification of Bioactive Compounds Extraction from Feijoa (*Feijoa Sellowiana* Berg.) Leaves Using Ultrasonic Waves", *Food Bioprod. Proc.*, vol. 108, pp. 37–50,

2018. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.12.004> ↑80, 81
- [15] O. R. Alara, N. H. Abdurahman, C. I. Ukaegbu, and N. A. Kabbashi, "Extraction and Characterization of Bioactive Compounds in *Vernonia Amygdalina* Leaf Ethanolic Extract Comparing Soxhlet and Microwave-Assisted Extraction Techniques", *J. Taibah U. Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 414-422, 2019. <https://doi.org/10.1080/16583655.2019.1582460> ↑80
- [16] C. Da Porto, E. Porretto, and D. Decorti, "Comparison of Ultrasound-Assisted Extraction with Conventional Extraction Methods of Oil and Polyphenols from Grape (*Vitis Vinifera* L.) Seeds", *Ultras. Sonoch.*, vol. 20, no. 4, pp. 1076-1080, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.12.002> ↑80
- [17] I. F. F. Benzie and M. Devaki, "The Ferric Reducing/Antioxidant Power (FRAP) Assay for Non-Enzymatic Antioxidant Capacity: Concepts, Procedures, Limitations and Applications", in *Measurement of Antioxidant Activity & Capacity: Recent Trends and Applications*; Apak R., Ca,panoglu E. and Shahidi F., New Jersey, United States: John Wiley & Sons Ltd, pp. 77-106, 2017. <https://doi.org/10.1002/9781119135388> ↑81
- [18] H. S. Arruda, G. A. Pereira, D. R. de Morais, M. N. Eberlin, and G. M. Pastore, "Determination of Free, Esterified, Glycosylated and Insoluble-Boundphenolics Composition in the Edible Part of Araticum Fruit (*Annona Crassiflora* Mart.) and its By-Products by HPLC-ESI-MS/MS", *Food Ch.*, vol. 245, pp. 738-749, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.120> ↑82
- [19] V. J. Cheng, A. Bekhit, M. McConnell, S. Mros, and J. Zhao, "Effect of Extraction Solvent, Waste Fraction and Grape Variety on the Antimicrobial and Antioxidant Activities of Extracts from Wine Residue from Cool Climate", *Food Ch.*, vol. 134, no. 1, pp. 474-482, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.02.103> ↑82
- [20] H.H. Orak, I. S. Bahrisefit, and T. Sabudak, "Antioxidant Activity of Extracts of Soursop (*Annona Muricata* L.) Leaves, Fruit Pulps, Peels, and Seeds", *Pol. J. Food Nut. Sci.*, vol. 69, no. 4, pp. 359-366, 2019. <https://doi.org/10.31883/pjfn/112654> ↑82, 83, 85
- [21] M. E. A. O. Souza, N. Mezzomo, L. C. Correa, M. S. Lima, L. C. Azevêdo and S. R. S. Ferreira, "Recovery of Antioxidant Compounds from Mango Peel By Green Extraction Processes", *International Food Research Journal*, vol. 26, no. 6, pp. 1845-1859, 2019. ↑83
- [22] O. M. Terrett and P. Dupree, "Covalent Interactions Between Lignin and Hemicelluloses in Plant Secondary Cell Walls", *Curr. Op. Biotech.*, vol. 56, pp. 97-104, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2018.10.010> ↑84
- [23] K. S. Ojha, R. Aznar, C. O'Donnell, and B. K. Tiwari, "Ultrasound Technology for the Extraction of Biologically Active Molecules from Plant, Animal and Marine Sources", *Tr. A. Ch.*, vol. 122, pp. 1-10, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115663> ↑84
- [24] A. Cvetanović, "Extractions without organic solvents: advantages and disadvantages", *Ch. Africa*, vol. 2, pp. 343-349, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42250-019-00070-1> ↑85
- [25] T. W. Caldas, K. E.L. Mazza, A. S.C. Teles, G. N. Mattos, A. I. S. Brígida, C. A. Conte-Junior, R. G. Borghini, R. L.O. Godoy, L. M.C. Cabral, and R. V. Tonon, "Phenolic Compounds Recovery from Grape Skin Using Conventional and Nonconventional Extraction Methods", *Ind. Crops Prod.*, vol. 111, pp. 86-91, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.012> ↑85, 87
- [26] C. B. T. Pal and G. C. Jadeja, "Microwave-Assisted Extraction for Recovery of Polyphenolic Antioxidants from Ripe Mango (*Mangifera Indica* L.) Peel Using Lactic Acid/Sodium Acetate Deep Eutectic Mixtures", *Food Sci. Tech. Int.*, vol. 26, no. 1, pp. 78-92, 2019. <https://doi.org/10.1177/1082013219870010> ↑85
- [27] M. H. Zeinab, A. S. Osheba, M. F. Khallaf, and A. A. Abdel, "Assessment of Grape Seeds as a Source of Antioxidant Compounds", *Arabs U. J. Agri. Sci.*, vol. 27, no. 1, pp. 501-509, 2019. <https://doi.org/10.21608/AJS.2019.43659> ↑85
- [28] Y. Li, J. Yao, C. Han, J. Yang, M. T Chaudhry, S. Wang, H. Liu, and Y. Yin, "Quercetin, Inflammation and Immunity", *Nutrients*, vol. 167, no. 8, pp. 1-14, 2016. <https://doi.org/10.3390/nu8030167> ↑85
- [29] R. V. Patel, B. M. Mistry, S. K. Shinde, R. Syed, V. Singh, and H. S. Shin, "Therapeutic Potential of Quercetin as a Cardiovascular Agent". *Euro. J. Med. Ch.*, vol. 115, pp. 889-904, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2018.06.053> ↑85, 89
- [30] W. Z. Lee, S. K. Chang, H. E. Khoo, C. M. Sia, and H. S. Yim, "Influence of Different Extraction Conditions on Antioxidant Properties of Sour-sop Peel", *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.*, vol. 15, no. 4, pp. 419-428, 2016. <https://doi.org/10.17306/J.AFS.2016.4.40> ↑87
- [31] B. Ayuda-Durán, S. González-Manzano, I. Gil-Sánchez, M. V. Moreno-Arribas, B. Bartolomé, M. Sanz-Buenhombre, A. Guadarrama, C. Santos-Buelga, and A. M. González-Paramás, "Antioxidant Characterization and

- Biological Effects of Grape Pomace Extracts Supplementation in *Caenorhabditis elegans*”, *Foods*, vol. 75, no. 8, pp. 1-14, 2019. <https://doi.org/10.3390/foods8020075> ↑87
- [32] A. Ruiz-Torralba, E. J. Guerra-Hernández, and B. García-Villanova, “Antioxidant Capacity, Polyphenol Content and Contribution to Dietary Intake of 52 Fruits Sold in Spain”, *CyTA-J. Food*, vol. 16, no. 1, pp. 1131-1138, 2018. <https://doi.org/10.1080/19476337.2018.1517828> ↑87
- [33] N. Čurko, K. Kelšin, V. Dragović-Uzelac, D. Valinger, M. Tomašević, and K. K. Ganić, “Microwave-Assisted Extraction of Different Groups of Phenolic Compounds from Grape Skin Pomaces: Modeling and Optimization”, *Pol. J. Food Nut. Sci.*, vol. 69, no. 3, pp. 235-246, 2019. <https://doi.org/10.31883/pjfn/109423> ↑87
- [34] R. L. Prior, “Oxygen Radical Absorbance Capacity (ORAC): New Horizons in Relating Dietary Antioxidants/Bioactives and Health Benefits”, *J. Funct. Foods*, vol. 18, pp. 797-810, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.12.018> ↑87
- [35] S. Abhijit, S. J. Tripathi, V. Bhagya, S. Rao, M. V. Subramanyam, and S. A. Devi, “Antioxidant Action of Grape Seed Polyphenols and Aerobic Exercise in Improving Neuronal Number in the Hippocampus is Associated with Decrease in Lipid Peroxidation and Hydrogen Peroxide in Adult and Middle-Aged Rats”, *Exp. Geront.*, vol. 101, pp. 101-112, 2018. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.exger.2017.11.012> ↑89
- [36] K. Yadav, R. Kumar, S. Mandal, P. Saha, and B. Mann, “Evaluation of Total Phenol Content and Antioxidant Properties of Encapsulated Grape Seed Extract in Yoghurt”, *Int. J. Dairy Tech.*, vol. 71, no. 1, pp. 96-104, 2018. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12464> ↑89
- [37] C. M. Ajila, K. A. Naidu, S. G. Bhat, and U. J. S. Prasada, “Bioactive Compounds and Antioxidant Potential of Mango Peel Extract”, *Food Ch.*, vol. 105, pp. 982-988, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.04.052> ↑89
- [38] Y. A. Vargas and L. I. Pérez, “Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente”, *Rev. Fac. Cien. Bás.*, vol. 14, no. 1, pp. 1-14, 2018. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108> ↑89

Ciliana Flórez Montes

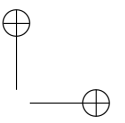
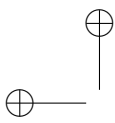
Chemical Engineer; Master’s Student in Chemical Engineering from Universidad Nacional de Colombia, Manizales. She belongs to the research group on waste utilization (GIAR).
E-mail: cflorezm@unal.edu.co

Andrés Felipe Rojas-González

Chemical Engineer from Universidad Nacional de Colombia, Manizales; MSc. in Chemical Engineering from Universidad del Valle, Cali, Colombia; PhD. in Engineering from Universidad del Valle, Cali, Colombia; leader of the research group on waste utilization (GIAR).
E-mail: anfrojasgo@unal.edu.co

Sneyder Rodríguez-Barona

Biologist from Universidad del Valle, Cali, Colombia; PhD. in Food Technology from the Polytechnic University of Valencia, Valencia, Spain. She belongs to the fruit food research group.
E-mail: snrodriguezba@unal.edu.co



Research

Pattern Recognition Algorithm for Automatic Quantification of *Toxoplasma gondii* Tachyzoites

Algoritmo de reconocimiento de patrones para cuantificación automática de taquizoitos de Toxoplasma gondii

Nataly Murcia-Zapata ¹, María Romero-Cerón ¹,
Graciela Juez-Castillo ¹, Brayan Valencia-Vidal ^{*,1}

¹Bioengineering Program, Faculty of Engineering, Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia

*Correspondence email: bavalenciav@unbosque.edu.co

Received: 2/4/2020. Modified: 14/8/2020. Accepted: 24/9/2020

Abstract

Context: Digital image processing is an efficient and suitable computational tool for the automatic quantification of human pathogens in images, providing analysis in less time, greater number of samples, and result reproducibility. We propose the development and validation of an image processing algorithm, for the recognition and automatic quantification of *T. gondii* tachyzoites.

Method: We developed an algorithm based on image processing. This workflow allows identifying the morphology of each parasite in the image by determining the number of parasites distinguishing them from those with a similar morphology, but not corresponding to the parasite in question. Images were obtained through Giemsa staining protocols.

Results: The original images were analyzed by experts. The results showed correlation with those obtained by the automatic count. Additionally, a processing time of 5 seconds per image was obtained with the algorithm. This automated quantification tool allowed count of tachyzoites in tens of images.

Conclusions: This automatic image analysis tool can extend its implementation to any laboratory that is involved in the quantification of extracellular *Toxoplasma gondii* tachyzoites, as well as other aspects of research on its tachyzoites that require the count of this form of development of the parasite.

Keywords: *Toxoplasma gondii*, tachyzoites, digital image processing, automatic quantification.

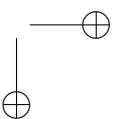
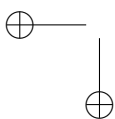
Language: English.



Cite this paper as: N. Murcia-Zapata, M. Romero-Cerón, G. Juez-Castillo and B. Valencia-Vidal "Pattern Recognition Algorithm for Automatic Quantification of *Toxoplasma gondii* Tachyzoites", *Ingeniería*, Vol. 26, Num. 1, pp. 93-110 (2021).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.16102>



Resumen

Contexto: El procesamiento digital de imágenes es una herramienta computacional eficiente y adecuada para la cuantificación automática de patógenos humanos en imágenes, proporcionando análisis en menos tiempo, mayor número de muestras y reproducibilidad en los resultados. Proponemos el desarrollo y validación de un algoritmo de procesamiento de imágenes, para el reconocimiento y cuantificación automática de taquizoitos de *T. gondii*.

Método: Desarrollamos un algoritmo basado en el procesamiento de imágenes. Este flujo de trabajo permite identificar la morfología de cada parásito en la imagen, determinando el número de parásitos presentes y diferenciando aquellas estructuras que presentan una morfología similar pero que no corresponden al parásito en cuestión. Las imágenes originales fueron obtenidas mediante protocolos de tinción Giemsa.

Resultados: Las imágenes originales fueron analizadas por expertos. Los resultados mostraron correlación con los obtenidos por el conteo automático. Además, se obtuvo un tiempo de procesamiento de 5 segundos por imagen con el algoritmo. Esta herramienta de cuantificación automática permitió el recuento de taquizoitos en decenas de imágenes.

Conclusiones: Esta herramienta de análisis automático de imágenes puede extender su implementación a cualquier laboratorio que esté involucrado en la cuantificación de taquizoitos extracelulares de *Toxoplasma gondii*, así como otros aspectos de la investigación sobre sus taquizoitos que requieran el conteo de este estado de desarrollo del parásito.

Palabras clave: *Toxoplasma gondii*, tachizoitos, procesamiento digital de imágenes, cuantificación automática.

Idioma: Inglés.

1. Introduction

Toxoplasmosis is a parasitic disease caused by the protozoan known as *Toxoplasma gondii* (*T. gondii*). This microorganism, like other parasites such as *Leishmania*, responsible for Leishmaniasis disease, and *Trypanosoma cruzi* for Chagas disease, are all obligate intracellular parasites and have the ability to infect humans cells [1]. It is estimated that there is high seroprevalence in humans due to *T. gondii*. Between 10,0 and 97,4% of adults have been exposed to the parasite depending on the different geographical areas [2]. Some studies indicate that this pathogen affects over one third of the global human population [3]. In Colombia, a seroprevalence of *T. gondii* is reported for an average of 41,7% of the human population without significant differences between men and women. It is also considered that there is an increased risk of infection in women in gestation [4].

It is known that in humans, *T. gondii* strongly affects the fetus, generating Congenital Toxoplasmosis [5]. Furthermore, for people immunocompromised with HIV, the reactivation of the chronic infection by *T. gondii* may be associated in most cases with encephalitis, focal neurological abnormalities, alterations in the functionality of the cerebellum, chorioretinitis, and the possibility of pulmonary symptoms [6]. Some studies report the relationship of *T. gondii* and the presence of neuropsychiatric symptoms such as schizophrenia [7]. An important feature of this parasite is its ability to use various means of transmission to cause infection. The presence of *T. gondii* oocysts and tachyzoites in water, vegetables [8], milk [9], among others, becomes a highly efficient mech-

anism to invade host cells. The consumption of undercooked meats with the presence of parasite tissue cysts is a focus of infection [10]. In Colombia, some studies report the presence of *T. gondii* and other protozoan parasites in drinkable water samples [11], as well as the detection of *T. gondii* in different types of meat distributed for human consumption [12].

The tachyzoite of *T. gondii* is considered a state of development with rapid proliferation and dissemination, associated with acute infection in humans [13]. In response to the host cell's immune system, the tachyzoite becomes a bradyzoite, which has the ability to stay within tissue cysts in the brain of its host [14]. Tachyzoite replication within the host cell is associated with intracellular processes induced by its protein machinery, which manipulates regulation processes regarding gene expression of the host cell to ensure and promote proliferation at the expense of the host [15]. One of the important events for the parasite to proliferate successfully is its multiplication within the host cell. The amount of parasites that replicate show their mitotic capacity and ensures parasitic virulence [16].

Within the *in vitro* processes that are carried out for studies of infection with *T. gondii*, previous counts of tachyzoites are performed to monitor the intracellular proliferation of the parasite. In several laboratories in Colombia, Neubauer chamber counting is used, due to its low cost and versatility. However, this method depends on the analysis capacity to recognize the different attributes of each cell and differentiate them from those particles that are also present in the sample but that do not correspond to a cell. Therefore, this count is susceptible to variations between users, which depends on their experience in the management of the biological model [17].

Another important consideration with respect to counting is that it requires more time for the analysis of each sample. Currently, automated tools have contributed in applications focused on the quantification of microorganisms, providing the possibility of counting a large number of samples in a short time, as well as, reducing the variability of the results associated with human error [17]. Image processing has emerged as an alternative for the automatic quantification of protozoan parasites. These automated quantification methods have allowed elucidating processes of cell growth, infection rates, parasitic load, among others [18].

In *Leishmania*, a protozoan parasite that is pathogenic for humans, fluorescence microscopy image processing algorithms have been developed to allow detecting *Leishmania* macrophages, amastigotes, and promastigotes resulting in the automatic counting of infected and uninfected macrophages, as well as parasite counts inside and outside the host cell. Based on these results, infection rates and parasitic loads were determined. These values that indicate the parasite's infection capacity in the host cell [19].

This paper presents the development of a computer vision algorithm as an alternative tool for quantification of *T. gondii* tachyzoites in images from biological samples, thus improving the accuracy and specificity of the count and also reducing the time in which the analysis can be performed. The availability of this computational strategy from engineering can provide a useful tool for measuring *T. gondii* tachyzoites, contributing with an advance in precision and reproducibility of results in the experimental processes of biological research.

2. Materials and methods

2.1. Biological Material

Tachyzoites of the RH strain of *T. gondii* were used in our study, and they were donated by Dr. Barbara Zimmermann from the Parasite Biochemistry and Molecular Biology research group of Universidad de los Andes. A PFHM-II culture medium of tachyzoites was removed by washing twice with PBS 1X (phosphate buffered saline) before carrying out chemical staining processes (1.000 g of centrifuge cells for 10 minutes at 4 °C). The tachyzoites were resuspended in PBS 1X and identified through microscopic observation.

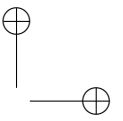
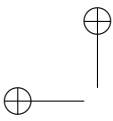
2.2. Chemical Staining

The adequate chemical staining of a biological sample is important in microscopy processes because the analysis of an image with computational tools depends on its quality. An adequate process of preparation and assembly of the sample facilitates the acquisition of data and reduces the duration of analyses. Therefore, it is often desirable to have a standardized protocol that allows imaging with minimal impurities to avoid uninterpretable results.

We standardized an experimental protocol for chemical staining of tachyzoites with conditions that allowed obtaining the images that were later used in the development and validation of the algorithm. In this work, all safety precautions were taken when working with *T. gondii* tachyzoites as an experimental model. A biosafety protocol used for the management of *T. gondii* was followed [20].

Conditions such as dilution factor, Giemsa reagent concentration, and final sample volume were taken into account. Giemsa staining is a standard method used for clinical diagnosis in some pathogenic microorganisms. It was initially designed for the demonstration of parasites such as *plasmodium* in malaria [21]. However, it is also currently used in field research for the study of cysts and tachyzoites of *T. gondii*. The slides were pre-washed with HCl 37% v/v for 24 hours. Several dilutions of the *T. gondii* tachyzoite samples were made (data not shown). Finally, the 1:5 dilution was found to be the most accurate to clearly show the shape and size of the parasites that were captured in each visual field.

Various concentrations of the Giemsa reagent were evaluated (data not shown). The concentration of 20% v/v allowed the characteristic morphology of the *T. gondii* tachyzoite to be stained with the appropriate color intensity. Various volumes of the sample to be fixed were also evaluated. Finally, 100 μ l were considered to be the indicated sample volume to fix on each slide. The sample was fixed with 70% v/v methanol, covered with 20% v/v Giemsa reagent for 15 minutes, and the excess staining was removed. Then, they were washed once in H₂O and dried at room temperature. Images were captured on a CX31 RTSF Olympus microscope with an EOS RbelT3i Canon camera using a 1000X magnification.



2.3. Image Processing

The digital image processing algorithm was designed using the Toolbox Image Processing from MATLAB 2014b. On a computer with 4 GB RAM, an Intel core i5 - 5200U, and Windows 8. 25 images (18 MP) were selected for algorithm calibration.

2.3.1. Image acquisition

The images used for manual counting and automatic counting were acquired with an Olympus Cx31 microscope, a 1000x magnification, and Canon EOS REBELT3i camera with an RGB CMOS 18 MP sensor. All analyzed samples followed the same laboratory protocol. Original images were used for manual counting without other processes, but automatic counting required additional processes in order to get a satisfactory result.

2.3.2. Pre-processing

Once the images were acquired, it was necessary to perform a series of steps to eliminate irrelevant information in the image. The blue and red channels were removed, since the green channel has a better contrast between the background of the image and the tachyzoites. This channel was passed to a gray scale. The threshold value was determined from the histograms of 25 images, and it was selected in such a way that tachyzoites were not removed from the image. Finally, the binarized image was obtained.

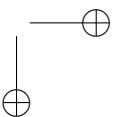
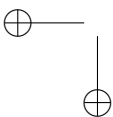
2.3.3. Segmentation

Morphological filters were applied to the images to reduce noise and highlight certain characteristics. This is done using an ellipsoid geometry, which is similar to the tachyzoites. In order to round the edges, an opening operation was performed, which consisted of erosion and dilation. In order to increase sharpness, a filling function was applied to fill the holes in the image and reduce noise, an opening operation was applied to eliminate any objects with a smaller number of connected pixels. Finally, each connected region was labeled.

2.3.4. Features extraction and classification

The characteristics used to classify segmented regions as tachyzoite and non-tachyzoite were: area, eccentricity, and major axis.

The major axis is the line that passes through the center of the image and is perpendicular to the minor axis, taking into account that the tachyzoites have an elongated morphology, it is possible to determine from this length if something is not a tachyzoite. However, this feature only considers one dimension. On the contrary, the area considers the two dimensions of each element. Finally, knowing that eccentricity is the relationship between the distance of the foci of the ellipse, and its main axis is the length, the eccentricity allows discriminating elements that do not meet the elongated morphology of tachyzoites.



The ranges for each of the characteristics were determined from 25 calibration images. In the images to be analyzed, if an element was outside the established ranges, it was classified as non-tachyzoite. Finally, the elements classified as tachyzoites were quantified, that is, elements within the ranges of the characteristics found.

2.4. Performance analysis of the computational algorithm

To evaluate the performance of the algorithm, 75 images were used. The count of tachyzoites in each original image was carried out by three experts. The average of this count experts was selected as a gold standard to quantify the performance of the developed automatic counting algorithm. A confusion matrix was performed by identifying the number of true positives (Tp), true negatives (Tn), false positives (Fp), and false negatives (Fn). Accuracy, precision, specificity, sensitivity (recall), and F-score metrics were calculated with the following formulas [22]:

$$accuracy = \frac{Tp + Tn}{Tp + Tn + Fp + Fn} \quad (1)$$

$$precision = \frac{Tp}{Tp + Fp} \quad (2)$$

$$recall = \frac{Tp}{Tp + Fn} \quad (3)$$

$$specificity = \frac{Tn}{Fp + Tn} \quad (4)$$

$$F - score = 2 * \frac{precision * recall}{precision + recall} \quad (5)$$

3. Results

3.1. Experimental Results

We obtained images with tachyzoites of stained *T. gondii* to develop the automatic quantification computational algorithm. Initially, images were obtained with the maximum concentration of the *T. gondii* tachyzoites (Fig. 1a). Different dilutions of the tachyzoites were made, which finally allowed obtaining the ideal concentration for the development of the algorithm (Fig. 1b). Giemsa staining allowed to observe the structure and morphology of the tachyzoites (Fig. 1c). The tachyzoite of *T. gondii* has a crescent shape, with a size of approximately $2 \times 6 \mu\text{m}$ (Fig. 1d). This stage has a slightly more pointed anterior end, which is defined by the direction of motility [23]. The parasite phenotype associated with shape and size is a relevant feature in image processing, so they are considered evaluation attributes in segmentation processes (Fig. 2).

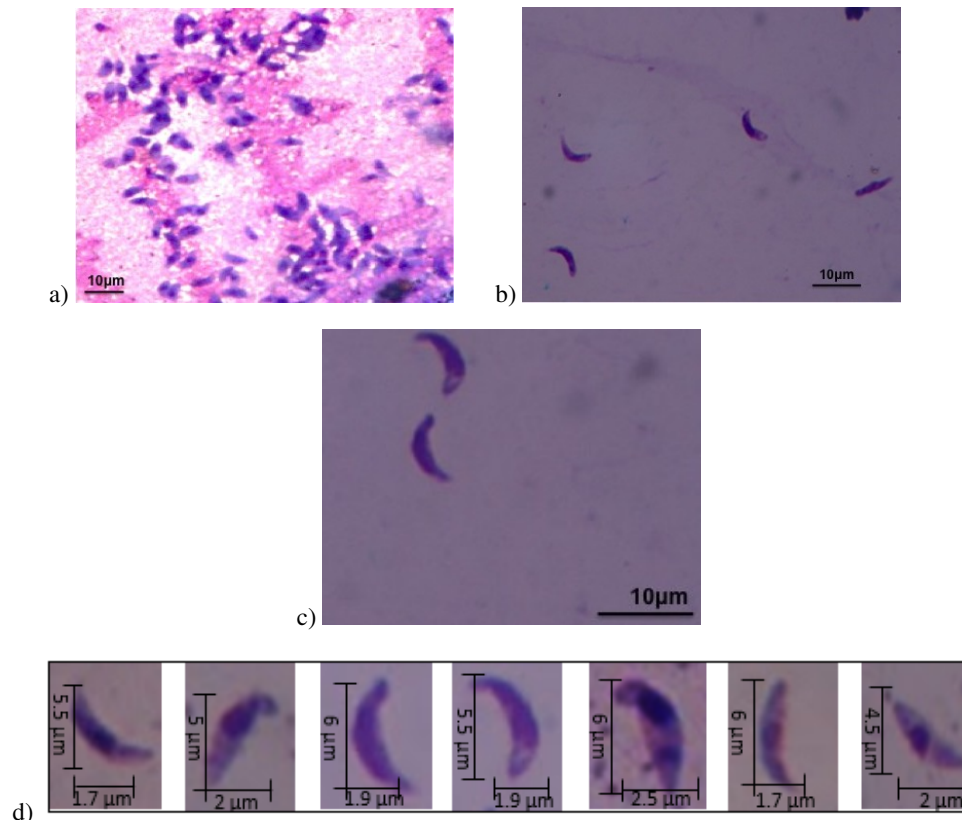


Figure 1. Stained *T. gondii* images with Giemsa. a) Maximum tachyzoite concentration b) 1,5 dilution factor of the tachyzoites c) Tachyzoite morphology d) Size of different tachyzoites

3.2. Samples and image digitalization

An experimental protocol was standardized, which included the conditions for the preparation of the sheets, the dilution factor, the concentration of the Giemsa reagent, and the volume of the sample fixed in the sheets. This protocol guaranteed to obtain images with the requirements established for the computational algorithm.

This process was necessary because there is no standardized experimental protocol for obtaining these images in the literature. As a final result, the experimental conditions were obtained (Table I), under which the images that were analyzed by the computational algorithm were obtained.

Figures 2 and 3 represent two out of 100 images in total that were obtained under the final conditions mentioned in Table I, and which were subjected to digital processing using the computational algorithm. During sample treatment, which involves the elimination of the culture medium, washing, and corresponding chemical staining, particles or impurities with similar morphology to the

tachyzoite of the parasite may appear in the final sample. These impurities appear as a product of the same experimental process of pretreatment of the biological sample, given that the cell forms are in suspension with a medium that provides them with the conditions required to maintain their cellular functionality. These particles are presented randomly in each obtained image. Fig. 3 shows tachyzoites and some similar impurities. These elements must be discarded by the counting algorithm. It should be noted that 25 images were used for algorithm calibration, and the remaining 75 were used for the validation process.

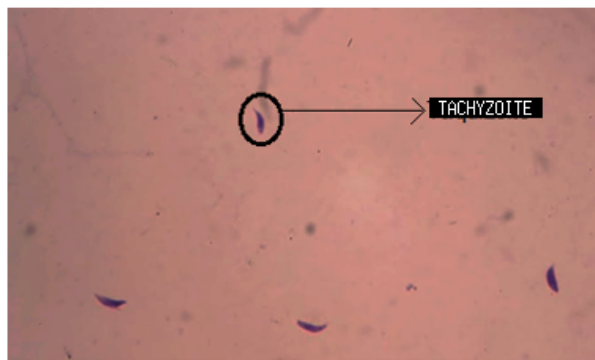


Figure 2. Application of staining protocol

Table I. Protocol parameters

Sample volumen	100 μ L
Dilution factor	1:5
Giemsa concentration	20% v/v
Magnification	1000x

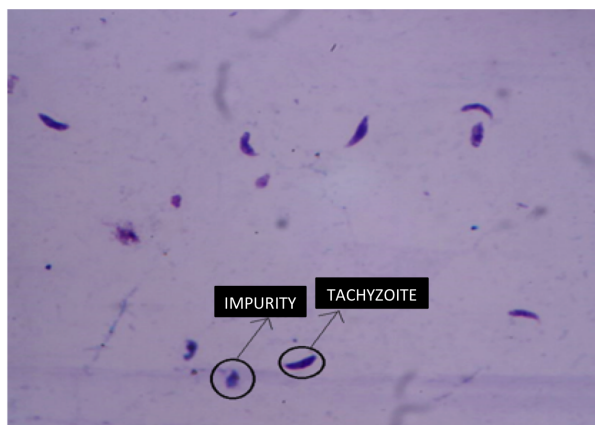


Figure 3. Differences between tachyzoites and non-tachyzoites

3.3. Image processing

Once the image was loaded into the computational algorithm, it was necessary to perform a pre-processing of the images. The image had to be converted from RGB to gray scale. It is important to highlight that it was taken on the green channel, which was exclusively selected because we observed that the tachyzoites in the background of the image stood out there (Fig. 4). The contrast was 180 in the original image, 201 in the green channel, 185 in the red channel, and 142 in the blue channel. This is very important because it allowed to perform thresholding and subsequent binarization.

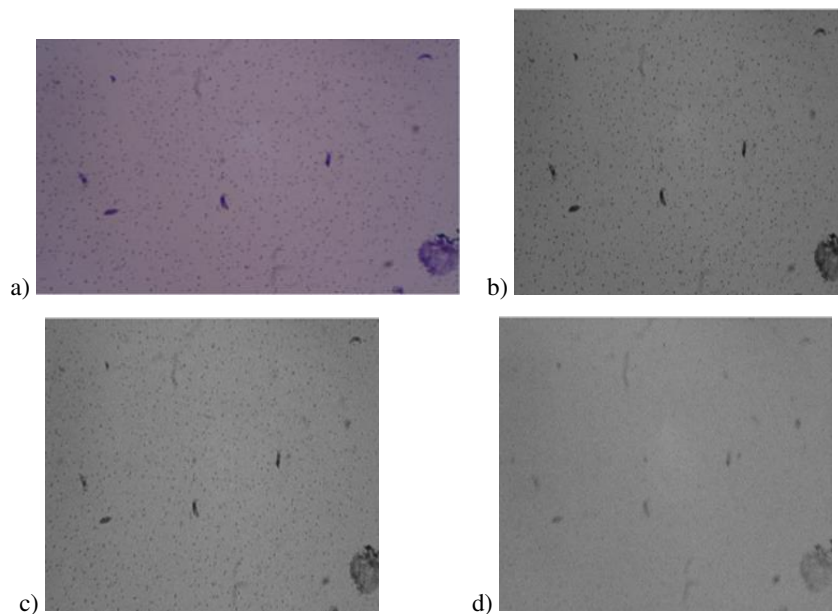


Figure 4. Channel comparison. a) RGB image. b) channel G. c) channel R. d) channel B.

The image was binarized by selecting a threshold value of 0,346. This value was determined from the histograms by calibrating the algorithm (trial and error) to easily identify the tachyzoites and guarantee that it did not eliminate any tachyzoites in the image. Next, morphology filters were executed to reduce image noise as described in section 2.3.3.

Fig. 5 shows the result of the preprocessing and segmentation described in the methodology.

Table II shows the results of the discriminant characteristics of the morphology of the *T. gondii* tachyzoites. The algorithm recognizes the tachyzoites present in the image with the characteristics of area, eccentricity, and major axis. These characteristics are discriminant and sufficient thanks to the specific morphology of the tachyzoites in question. These characteristics allow distinguishing the tachyzoites from the non-tachyzoites present in the obtained images (Fig. 6). The intervals of the characteristics were evaluated several times by means of a calibration done with 25 images of the tachyzoite sheet.

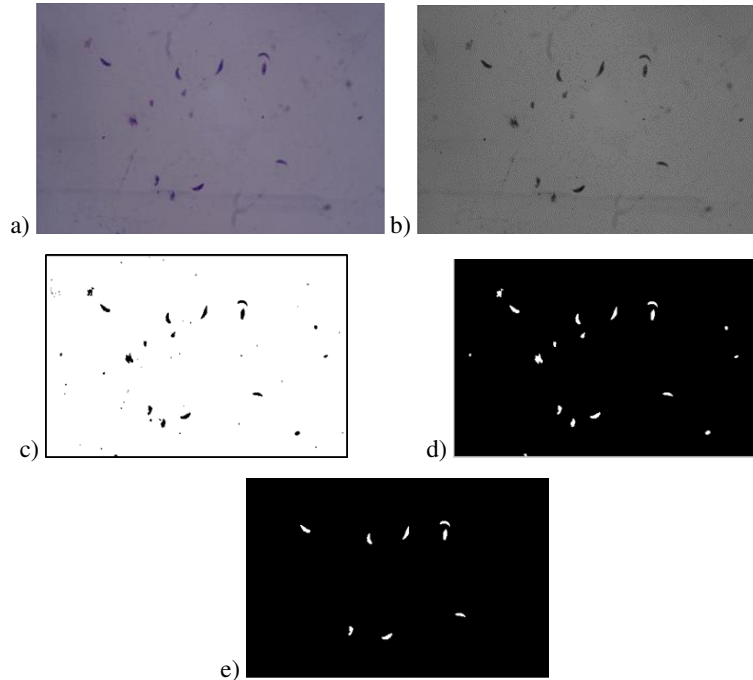


Figure 5. Image processing results: a) original image, b) channel G, c) threshold result, d) applying morphological filter, e) classified tachyzoites

Table II. Discriminatory characteristics

Characteristic	Interval
Area	16.000, 45.000 px
Eccentricity	0,89, 0,98
Mayor axis	270, 290 px

3.4. Validation

75 images were used for the validation of the algorithm. Three experts counted the tachyzoites independently in each image. The histogram (Fig. 7) shows the frequency of the number of tachyzoites per image obtained by each of the experts.

Our algorithm also performed the tachyzoite count in all 75 images. Fig. 8 compares the results obtained by the algorithm and the experts in some of the images used for validation. With the individual tachyzoite count per image, it was possible to determine the total tachyzoites in the images (Fig. 9).

The average of the count of the 3 experts (manual count) in each image was used as the true value to be compared with the result of the algorithm (Fig. 10). With this data, the correlation between

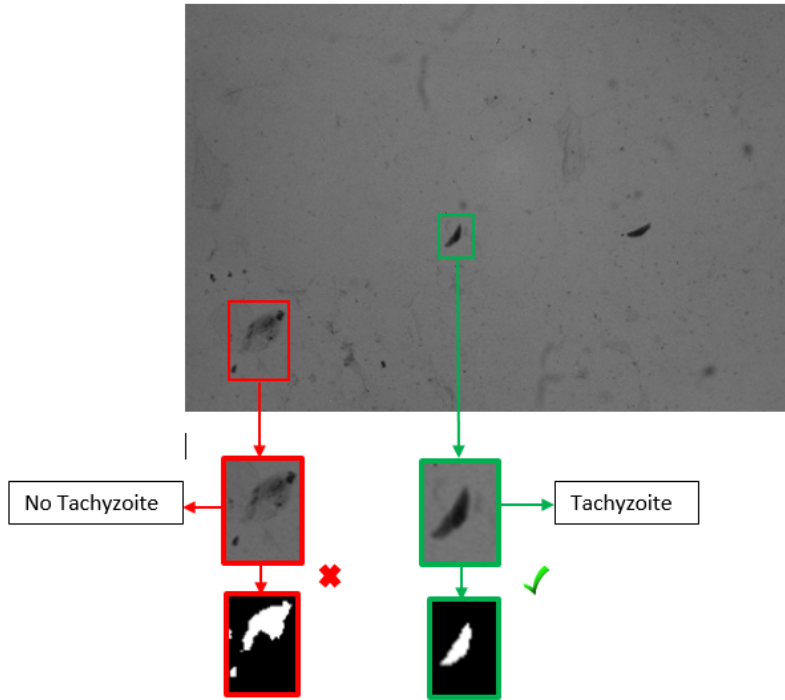


Figure 6. Tachyzoite classification by algorithm

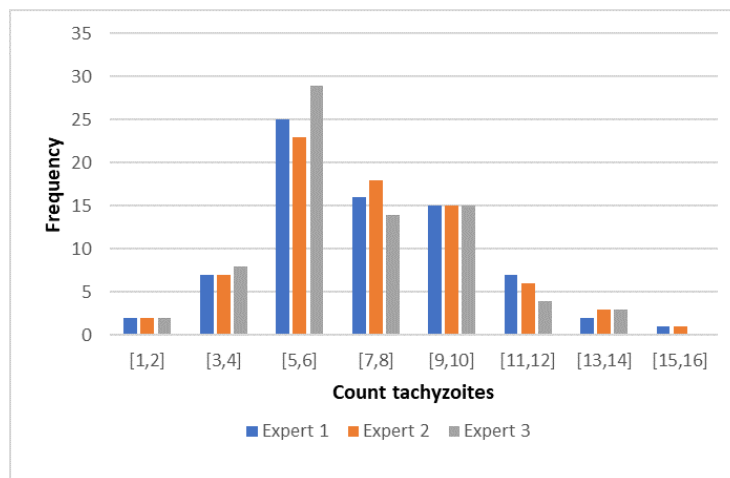


Figure 7. Histogram of tachyzoites counted by experts (per image)

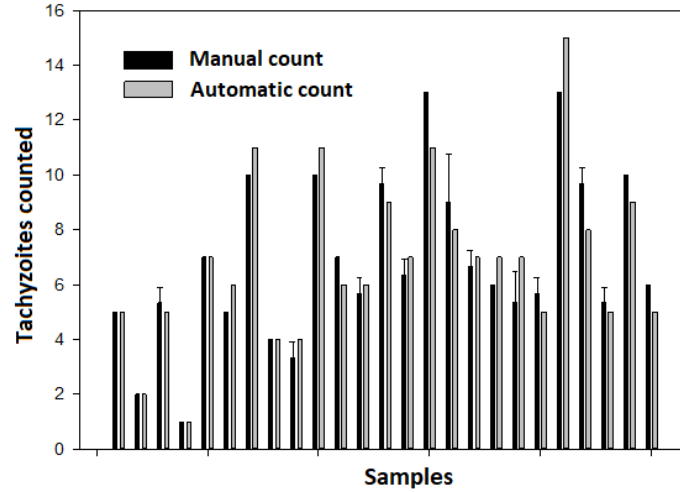


Figure 8. Comparison between average manual count and automatic count

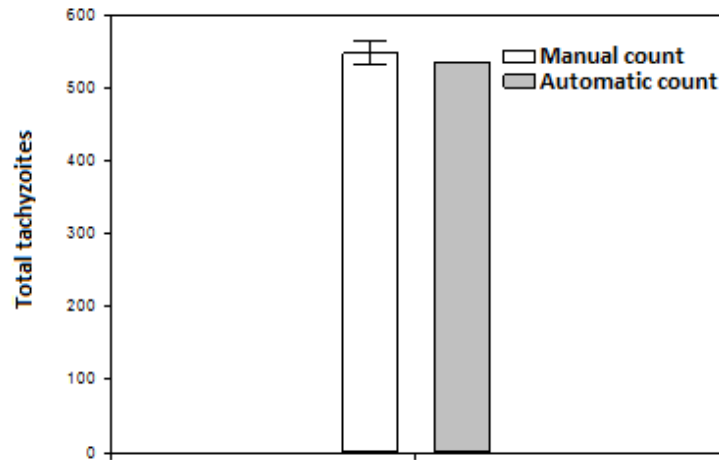


Figure 9. Total tachyzoites counted

the manual count and the one made automatically by the algorithm was determined with a Pearson correlation coefficient $r = 0,91$. This indicates that the correlation is statistically significant (p -value = 0,00001), and the model (computational algorithm) could be used to estimate the number of tachyzoites automatically.

With the data provided by the experts, it was possible to determine the number of true positives (Tp), true negatives (Tn), false positives (Fp), and false negatives (Fn) (Table III). False positives refer to elements in the that are misclassified as tachyzoites, that is, tachyzoites that do not exist in

the image but are recognized and counted by the algorithm. False negatives are tachyzoites that are not recognized or classified as non-tachyzoites by the algorithm; they are therefore not counted.

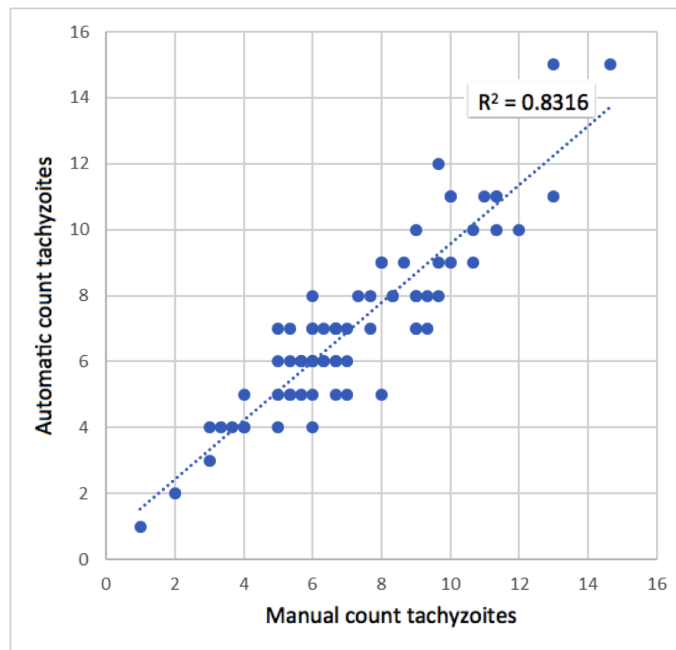


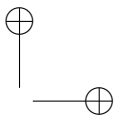
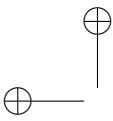
Figure 10. Scatter plot between manual count and automatic count

Table III. Confusion matrix

		Actual	
		Positive	Negative
Predicted	Positive	490	40
	Negative	29	332

Table IV. Algorithm validation

Accuracy	92,25%
Precision	92,45%
Sensitivity	94,41%
Specificity	89,24%
F-score	0,93



Using the Eqs. (1 - 5) the performance of the algorithm was determined, obtaining the results in Table IV.

4. Discussion

Nowadays, different types of software and algorithms dedicated to the identification and automatic quantification of parasites have been developed. However, due to the biological development of each microorganism, there are phenotypical variations, which implies considering particular characteristics in the identification of each species. For this reason it, is important to develop of computational tools that respond to the needs of the diagnosis and detection of each type of pathogen.

We developed and validated an algorithm for the automatic quantification of *T. gondii* tachyzoites in images. The validation of the algorithm was carried out by comparing the results obtained from manual counting.

Fig. 7 shows that there are differences between the counts made by the different experts. This difference in the number of tachyzoites per image is usually greater when there are more tachyzoites in the image. Some bars in Fig. 8 show a greater dispersion due to the large number of tachyzoites, which proves that human experts can make mistakes of a certain tolerance.

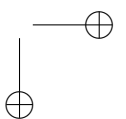
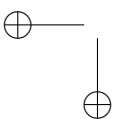
The accuracy of the algorithm was 92,25% (Table IV), which indicates that the quantification obtained by the computational algorithm is close to the average value of the quantification obtained by the experts (Fig. 9).

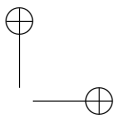
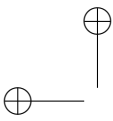
The precision of the computational algorithm was one of the measurement parameters selected for the validation of the algorithm. It indicates the dispersion between the data obtained during the automatic count, and it is represented as a function of the standard deviation (Table IV). The result obtained for precision was 92,45%, which representing a significant value for the computational algorithm and a large confidence interval.

Although Fig. 8 shows some differences between and manual counting per image, these data are within a close range. These differences decrease if a larger number of samples is taken (Fig. 9). Our computational algorithm allows to have fixed criteria for the identification and quantification of tachyzoites, making it possible for different studies to be compared if the same counting tool is used, thus eliminating the possible bias that may be due to human error. All this statistical analysis allows inferring that the computational algorithm is a reliable and precise tool for the quantification of *T. gondii* tachyzoites.

In our algorithm, images obtained with specific parameters and generated from a standardized experimental protocol were used. Therefore, we can infer that similar results are expected when replicating the parameters described both for the treatment of the biological sample and for obtaining the images.

Furthermore, the running time of the algorithm is not susceptible to the number of tachyzoites





in image, which is approximately 5 seconds per image. However, manual counting has a stronger effect on the time; more tachyzoites in the image require more time to count, and the error can be greater.

[24] reported a new method for the identification of *T. gondii* tachyzoites by recognizing the specific morphology of the banana or crescent-shaped parasite, with results comparable to those obtained by our algorithm. Our computational tool allows identifying the shape of the tachyzoite and exclude those objects present in the image that do not correspond to the morphology of the parasite. Furthermore, our images were obtained using a simple and practical chemical staining method, which is implemented as a detection method in laboratories in developing countries.

Other studies report images analysis methods of *T. gondii* by determining host-pathogen interaction [25]. Likewise, automatic quantification studies are reported for other parasitic pathogens, [1] reported a computational tool called INsPECT, a versatile and open source software for the automated quantification of intracellular parasites (*Leishmania*), which is proposed as a new, fast, and easy alternative to the classical intracellular quantification methods. [18] also reported an automated image analysis protocol for the quantification of intracellular forms of *Leishmania spp.*, by means of the IN Cell Investigator Developer Toolbox, a program that identifies individual macrophages and amastigote forms of the parasite within the host cell.

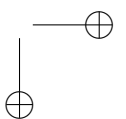
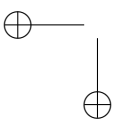
Another work related to image processing reports the characterization of biological forms for the automatic recognition of images and diagnosis of protozoan parasites of the *Eimeria* genus; a mathematical model was developed to characterize the morphology of the oocysts of this parasite [26].

Our method for the analysis of images of *T. gondii* tachyzoites can become a low-cost diagnostic tool. Additionally, our automatic counting model can be extended in its use to be potentially used in the identification of the bradyzoite state of the same parasite, considering that the morphology is similar to that of the tachyzoite, which the algorithm more versatile.

5. Conclusions

In this work, we have developed and validated an algorithm for the automated count of tachyzoites of *T. gondii* in images. This method is based on the attributes of tachyzoites regarding morphology and size. We demonstrated that the image processing method has a good correlation with manual counting by experts. Moreover, we showed that the execution time of the algorithm improved in comparison with by human observation. It also demonstrated its suitability to recognize the structure of tachyzoite and differentiate them from those particles that were present in the image but were not tachyzoites. This automated quantification tool allowed counting tachyzoites in tens of images. Additionally, the manual microscopic count of tachyzoites depends on the expert and requires time to analyze the images. This can be replaced by the use of this image processing algorithm, which analyzes conventional optical microscopy images generated with high quality, cheap, and easy-to-perform staining.

In summary, we have developed a specific and quantitative tool that can become an automatic



quantification strategy for *T. gondii* tachyzoites in images. It is important to consider that the algorithm that we have developed was validated for the identification of the tachyzoite state of the *T. gondii* parasite, which has a specific morphology that was applied in the development of the computational tool. This algorithm was not validated in other stages of the biological development of the parasite. Furthermore, it is important to consider that the validation of the algorithm has been carried out on images obtained from culture samples with extracellular forms of the parasite.

6. Acknowledgments

We thank Barbara Zimmermann (BBMP Research Group, Universidad de los Andes, Colombia) for the samples of tachyzoites from the *Toxoplasma gondii* RH strain; Juan Miguel Escobar (Bio-engineering Program, Universidad el Bosque, Colombia), who provided access to the Engineering Science laboratories; and Oscar Arias (Electronic Engineering Program, Universidad El Bosque, Colombia) for his advice on image processing.

References

- [1] E. Yazdanparast, A. D. Anjos, D. Garcia, C. Loeuillet, H. R. Shahbazkia, and B. Vergnes, "Inspect, an open-source and versatile software for automated quantification of (leishmania) intracellular parasites," *PLoS Negl. Trop. Dis.*, vol. 8, no. 5, 2014. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0002850> 94, 107
- [2] F. Pinto-Ferreira, E. T. Caldart, A. K. S. Pasquali, R. Mitsuka-Bregano, R. L. Freire, and I. T. Navarro, "Patterns of transmission and sources of infection in outbreaks of human toxoplasmosis," *Emerg. Infect. Dis.*, vol. 25, no. 12, pp. 2177 – 2182, 2019. doi: <https://doi.org/10.3201/eid2512.181565> 94
- [3] D. Schluter and A. Barragan, "Advances and challenges in understanding cerebral toxoplasmosis," *Front. Immunol.*, vol. 10, no. 242, 2019. doi: <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.00242> 94
- [4] W. Cañón-Franco, N. López-Orozco, J. Gómez-Marín, and J. P. Dubey, "An overview of seventy years of research (1944 – 2014) on toxoplasmosis in colombia, south america," *Parasit. Vectors*, vol. 7, no. 427, pp. 1 – 15, 2014. doi: <https://doi.org/10.1186/1756-3305-7-427> 94
- [5] Z. Koloren and J. P. Dubey, "A review of toxoplasmosis in humans and animals in turkey," *Parasitology*, vol. 1, no. 17, pp. 19 – 30, 2019. doi: <https://doi.org/10.1017/S0031182019001318> 94
- [6] K. Simekova, E. Novakova, R. Rosolanka, J. Masna, and D. Antolova, "Clinical course of opportunistic infections-toxoplasmosis and cytomegalovirus infection in hiv-infected patients in slovakia," *Pathogens*, vol. 8, no. 4, 2019. doi: <https://doi.org/10.3390/pathogens8040219> 94
- [7] M. Lari, H. Farashbandi, and F. Mohammadi, "Association of toxoplasma gondii infection with schizophrenia and its relationship with suicide attempts in these patients," *Trop. Med. Int. Health*, vol. 22, no. 10, pp. 1322 – 1327, 2017. doi: <https://doi.org/10.1111/tmi.12933> 94
- [8] A. A. Marchioro, B. T. Tiyo, C. M. Colli, C. Z. de Souza, J. L. Garcia, M. L. Gomes, and A. L. Falavigna-Guilherme, "First detection of toxoplasma gondii dna in the fresh leaf of vegetables in south america," *Vector Borne Zoonotic Dis.*, vol. 16, no. 9, pp. 624 – 626, 2016. doi: <https://doi.org/10.1089/vbz.2015.1937> 94
- [9] A. Vismarra, E. Barilli, M. Miceli, C. Mangia, C. Bacci, F. Brindani, and L. Kramer, "Toxoplasma gondii and pre-treatment protocols for polymerase chain reaction analysis of milk samples: A field trial in sheep from southern italy," *Ital. J. Food Saf.*, vol. 6, no. 1, pp. 299 – 303, 2017. doi: <https://doi.org/10.4081/ijfs.2017.6501> 94
- [10] X. Y. Liu, Z. D. Wang, S. El-Ashram, and Q. Liu, "Toxoplasma gondii oocyst-driven infection in pigs, chickens and humans in northeastern china," *BMC Vet. Res.*, vol. 15, no. 1, 2019. doi: <https://doi.org/10.1186/s12917-019-2121-4> 95
- [11] J. F. Trivino-Valencia, J. D. Zuluaga, and J. E. Gomez-Marín, "Detection by pcr of pathogenic protozoa in raw and drinkable water samples in colombia," *Parasitol. Res.*, vol. 115, no. 5, pp. 1789 – 1797, 2016. doi: <https://doi.org/10.1007/s00436-016-4917-5> 95

- [12] D. M. Campo-Portacio, M. A. Discuviche-Rebolledo, P. J. Blanco-Tuirán, Y. M. Montero-Pérez, K. E. Orozco-Méndez, and Y. M. Assia-Mercado, “Detección de toxoplasma gondii por amplificación del gen b1 en carnes de consumo humano,” *Infectio*, vol. 18, no. 3, pp. 93 – 99., 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.infect.2014.05.001> 95
- [13] P. J. Lescault, B. Thompson, V. Patil, D. Lirussi, A. Burton, J. Margarit, J. Bond, and M. Matrajt, “Genomic data reveal toxoplasma gondii differentiation mutants are also impaired with respect to switching into a novel extracellular tachyzoite state,” *PLoS ONE*, vol. 5, no. 12, 2010. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014463> 95
- [14] I. J. Blader, B. I. Coleman, C. T. Chen, and M. J. Gubbels, “Lytic cycle of toxoplasma gondii: 15 years later,” *Annu. Rev. Microbiol.*, vol. 69, no. 1, pp. 463 – 485, 2015. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-091014-104100> 95
- [15] M. J. Holmes, P. Shah, R. C. Wek, and W. J. Sullivan, “Simultaneous ribosome profiling of human host cells infected with toxoplasma gondii,” *MSphere*, vol. 4, no. 3, pp. 19 – 30, 2019. doi: <https://doi.org/10.1128/msphere.00292-19> 95
- [16] R. Useo, F. Husson, J. D. Coninck, S. Khaldi, and P. Gervais, “A new alternative in vitro method for quantification of toxoplasma gondii infectivity,” *J. Parasitol.*, vol. 98, no. 2, pp. 299 – 303, 2012. doi: <https://doi.org/10.1645/GE-2873.1> 95
- [17] D. Cadena-Herrera, J. E. Esparza-De Lara, N. D. Ramírez-Ibañez, C. A. López-Morales, N. O. Pérez, L. F. Flores-Ortiz, and E. Medina-Rivero, “Validation of three viable-cell counting methods: Manual, semi-automated, and automated,” *Biotechnol. Rep. (Amst)*, vol. 7, no. 1, pp. 9 – 16, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2015.04.004> 95
- [18] A. G. Gomes-Alves, A. F. Maia, T. Cruz, H. Castro, and A. M. Tomás, “Development of an automated image analysis protocol for quantification of intracellular forms of leishmania spp,” *PLoS One*, vol. 13, no. 8, pp. 19 – 30, 2018. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201747> 95, 107
- [19] M. J. Dagley, E. C. Saunders, K. J. Simpson, and M. J. McConville, “High-content assay for measuring intracellular growth of leishmania in human macrophages,” *Assay Drug Dev. Technol.*, vol. 13, no. 7, pp. 389 – 401, 2015. doi: <https://doi.org/10.1089/adt.2015.652> 95
- [20] S. E. Staggs, M. J. See, J. P. Dubey, and E. N. Villegas, “Obtaining highly purified toxoplasma gondii oocysts by a discontinuous cesium chloride gradient,” *JoVE*, vol. 33, p. 1420, 2009. doi: <https://doi.org/10.3791/1420> 96
- [21] J. Barcia, “The giemsa stain: Its history and applications,” *Int. J. Surg. Path.*, vol. 15, no. 3, pp. 292-296, 2007. doi: <https://doi.org/10.1177/1066896907302239> 96
- [22] L. A. Jeni, J. F. Cohn, and F. De La Torre, “Facing imbalanced data—recommendations for the use of performance metrics,” in *2013 Hum. Assoc. Conf. Aff. Comp. Intell. Inter. pp. 245–251, 2013.*, 2013. doi: <https://doi.org/10.1109/ACII.2013.47> 98
- [23] D. J. P. Ferguson and J. F. Dubremetz, “The ultrastructure of toxoplasma gondii. in toxoplasma gondii: The model apicomplexan - perspectives and methods: 2nd ed,” *Elsevier ltd*, vol. 13, no. 7, p. 19–59, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396481-6.00002-7> 98
- [24] S. Li, A. Li, D. A. M. Lara, J. E. G. Marín, M. Juhas, and Y. Zhang, “Transfer learning for toxoplasma gondii recognition,” *mSystems*, vol. 5, 2020. doi: <https://doi.org/10.1128/mSystems.00445-19> 107
- [25] D. Fisch, A. Yakimovich, B. Clough, J. Wright, M. Bunyan, M. Howell, J. Mercer, and E. Frickel, “Defining host–pathogen interactions employing an artificial intelligence workflow,” *Elife*, vol. 8, 2019. doi: <https://doi.org/10.7554/eLife.40560> 107
- [26] C. A. Castañón, J. S. Fraga, S. Fernandez, A. Gruber, and L. da F. Costa, “Biological shape characterization for automatic image recognition and diagnosis of protozoan parasites of the genus eimeria,” *Patt. Rec.*, vol. 40, no. 7, pp. 1899 – 1910, 2007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2006.12.006> 107

María Paula Romero Cerón

She was born in Sogamoso (Boyacá), Colombia. She earned a Bachelor's degree in bioengineering at Universidad El Bosque and was awarded a honorable mention for her graduation project in digital image processing. She started to work as an environmental consultant at BioAp SAS in 2016, and she has developed projects of socio-environmental impact and assessment of greenhouse gas emissions (GHG) in the palm sector.

Nataly Murcia-Zapata

Bioengineer, graduated from Universidad El Bosque, with honorable mention for her degree work in molecular biology and digital image processing. She currently works as a research professor at Corporación Universitaria del Meta. Molecular Biology, Social, and Human Sciences are part of her active lines of research.

Graciela Juez-Castillo

Master in Biological Sciences. She is currently an assistant professor of the Bioengineering Program of Universidad El Bosque (Bogotá, Colombia). She is a member of the Osiris Bioaxis group of the same university. Her areas of interest are molecular biology, genomics and proteomics, among other omics sciences.

Brayan Valencia-Vidal

Mechatronic engineer from National University of Colombia. He is currently a professor of the at bioengineering program of Universidad El Bosque (Bogotá, Colombia).



Instrucciones para los Autores

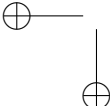
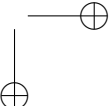
Introducción

La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los temas del campo de la Ingeniería. Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la ingeniería a través de la publicación de artículos originales e inéditos, con pertinencia local o internacional.

Todo artículo es evaluado de manera doble-ciega por pares revisores antes de ser calificado como candidato para publicar. El Comité Editorial, tomando en cuenta los conceptos emitidos por los evaluadores y el cumplimiento de las políticas editoriales de la Revista, decide la publicación del artículo en una edición futura. Todos los artículos presentados a la revista INGENIERÍA deben ser inéditos. No se publicarán artículos que hayan sido anteriormente publicados o que hubieren sido sometidos por el autor o los autores a otros medios de difusión nacional o internacional para su publicación.

Clasificación de los artículos

La clasificación de un artículo científico dependerá de la naturaleza del nuevo conocimiento que reporte, lo que nos lleva a plantear la siguiente tipificación:

- **Investigación:** son aquellos que abordan una pregunta sobre un aspecto disciplinar teórico o aplicado, usualmente mediante un estudio científico del comportamiento de un fenómeno o una situación bajo ciertas condiciones de control.
 - **Metodología:** estudios enfocados en presentar un nuevo método de solución para una categoría particular de problemas, demostrando resultados favorables en comparación con el estado del arte o de la técnica. Son investigaciones específicamente dedicadas a validar las bondades y desventajas del método que proponen o a realizar caracterizaciones comparativas de varios métodos en dominios disímiles o inexplorados.
 - **Revisión:** los que presentan análisis críticos, sistemáticos, delimitados y exhaustivos, sobre los avances, tendencias, resultados positivos y negativos, vacíos y futuras rutas de investigación encontrados en el actual estado del arte o de la técnica.
 - **Perspectiva:** aquellos que, recurriendo a fuentes bibliográficas originales y con un discurso argumentativo y controversial, cuestionan el actual estado del arte o de la técnica, proponen visiones alternativas a las corrientes de pensamiento dominantes, critican la vanguardia de la disciplina o instigan un viraje hacia tópicos de investigación abandonados o desentendidos por la comunidad científica. Usualmente más que una reflexión personal, buscan establecer una posición colectiva (de comunidad científica), sustentada en una discusión que combina introspectiva, retrospectiva y prospectiva sobre el asunto en cuestión.
 - **Reporte de Caso:** los que buscan divulgar un hallazgo novedoso encontrado durante o posterior a un caso particular de desarrollo tecnológico, que eventualmente podría generalizarse mediante una investigación más amplia (aplicada a más casos) y que por lo tanto ameritan ser conocidos por la comunidad para convocarla en tal sentido. Más que
- 
- 



enfatar en el desarrollo tecnológico o innovación per sé, se enfocan en caracterizar el conocimiento descubierto en el caso de estudio respectivo.

- **Editoriales, Cartas al Editor, Artículo Invitado:** son las únicas categorías que no reportan nuevo conocimiento, sino que discuten temas de interés para la Revista, para su línea editorial o para su comunidad, con un carácter de opinión informada.

Para una mayor información de la explicación y/o diferencias de la anterior clasificación los invitamos a visitar el siguiente enlace “Guía breve de clasificación de artículos en INGENIERÍA”.
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11131/12114>

Procedimiento para el envío de artículos

Los autores deberán enviar al Editor los siguientes documentos mediante la plataforma Open Journal System (OJS) de la Revista:

- Carta de presentación y originalidad del artículo: el formato de la presente carta se puede descargar en el siguiente enlace:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5087/11961> (Formato PDF)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11486/12242> (Formato Word)

La finalidad de la carta es certificar que el artículo es inédito, que no está sometido a otra publicación y que aceptan las normas de publicación de la Revista.

- El artículo en formato digital utilizando la plantilla y las normas de presentación que se pueden consultar en el siguiente enlace (instrucciones a los autores):

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/4979/11816> (Formato PDF)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5233/11815> (Formato Word)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/9539/10775> (Formato Latex)

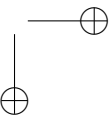
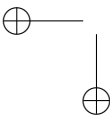
- Los autores relacionarán en el correo de postulación del artículo dos posibles evaluadores que cumplan las siguientes condiciones:

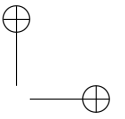
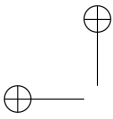
- Debe tener al menos título de maestría.
- Pertener a una institución diferente a la de los autores.
- Haber realizado publicaciones en los últimos tres años.

Nota: Enviar los datos de los contactos de los posibles evaluadores (nombre completo, institución y correo electrónico). Esta información también puede ser enviada a la siguiente dirección electrónica: revista_ing@udistrital.edu.co

- En caso de ser aceptado, los autores del artículo se comprometen a diligenciar el formato de cesión de derechos para publicación. Se puede descargar en el siguiente enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5091/6711>

Se puede consultar la guía rápida para autores en la plataforma OJS en el enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5540/7070>



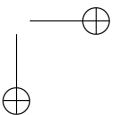
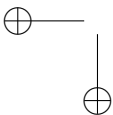


Aspectos a tener en cuenta

- Se considera un artículo largo cuando tiene más de diez (10) páginas con este formato. Por consiguiente se recomienda tener como límite diez (10) páginas para la elaboración de un artículo. El Comité Editorial podría solicitar a los autores reducir el tamaño del artículo cuando lo considere demasiado largo.
- Los resultados de las evaluaciones de los pares árbitros y las modificaciones que requiera el Comité Editorial serán notificados a los autores a través de la plataforma OJS y al correo electrónico del autor de correspondencia. Los autores deberán enviar nuevamente el artículo con las modificaciones sugeridas sin nombres y sin biografías. En general, este intercambio de sugerencias y modificaciones puede llegar a presentarse una, dos o más veces después de presentar el artículo.
- Cuando un artículo no cumple con las condiciones definidas para la revista, el Comité Editorial podría decidir no publicarlo. En este caso, el autor o los autores serán notificados de la decisión.

Derechos de autor

El contenido completo de la licencia Creative Commons, bajo la cual se resguardan los derechos de autor de aquellos que publican en la Revista INGENIERÍA, puede consultarse en: Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0.





Instructions for authors

Aim and scope

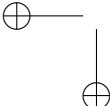
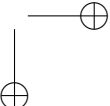
INGENIERÍA Journal is a scientific publication with a periodicity published every four months by Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Its main goal is to disseminate and discuss advances in research and development in the different areas of engineering through the publication of original unpublished papers.

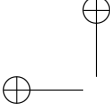
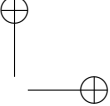
The intended audience of the Journal is the academic community, researchers, graduates, productive sectors and in general the public interested in all engineering disciplines.

Submitted papers are double-blind peer-reviewed by at least two experts in the field, before being qualified as a candidate to be published. The Editorial Board grounds its acceptance decision on the basis of the recommendations given by the experts and the fulfillment of the editorial policies of the Journal. All papers submitted to INGENIERÍA Journal must be unpublished and not submitted to publication to other journal, although papers previously published in conference proceedings may be considered if substantial extensions are included.

Types of papers

Papers published in INGENIERIA Journal are classified according to the nature of the new knowledge it reports, as follows:

- **Research:** These are papers that address a question about a theoretical or applied disciplinary aspect, usually through a scientific study of the behaviour of a phenomenon or a situation under certain control conditions.
 - **Methodology:** These are papers focusing on presenting a new method of solution for a particular category of problems, demonstrating favorable results compared to the state of the art or technique. They are investigations specifically dedicated to validate the advantages and disadvantages of the method proposed or to perform comparative characterisations of several methods in dissimilar or unexplored domains.
 - **Review:** These are papers that present critical, systematic, delimited and exhaustive analyzes on the progress, trends, positive and negative results, gaps and future research routes found in the current state of the art or technique.
 - **Perspective:** These are papers that, using original bibliographical sources and argumentative and controversial discourse, question the current state of art or technique, propose alternative visions to dominant currents of thought, criticise the vanguard of the discipline or call for the attention towards research topics abandoned or disregarded by the scientific community. Usually more than a personal reflection, they seek to establish a collective (scientific community) position, based on a discussion that combines introspective, retrospective and prospective on the subject in question.
 - **Case Report:** These are papers intending to disclose a novel finding found during or after a particular case of technological development, which could eventually be generalised by a more extensive investigation (applied to more cases) and which therefore deserve to be known by the community. In other words, rather than emphasising on technological development or innovation per se, they focus on characterising preliminary knowledge discovered in the respective case study.
- 
- 

- 
- 
- **Editorials:** Letters to the Editor, Guest Article: These are the only contributions that do not report new knowledge, but discuss topics of interest for the Journal, for its editorial line or for its community, with an informed opinion style.

Procedure for the submission of papers

Authors should submit to the Editor the following documents using our Open Journal System (OJS) platform:

- Cover letter and originality statement: a template can be downloaded from:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5087/11961> (PDF Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/11486/12242> (Word format)

- The manuscript formatted according to the template and style of the instructions to authors:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/4979/11816> (PDF Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5233/11815> (Word Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/9539/10775> (Latex Format)

- (Optional) Suggestions of two candidate experts for peer review, complying with:

– Must have a PhD. Degree

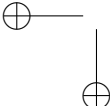
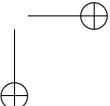
– Must belong to an institution other than the authors’

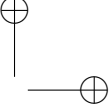
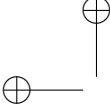
– Have publications in recognised journals in the last two years

- If accepted for publication, the authors must agree with and submit a copyright form that transfers rights for publication. This form can be downloaded from:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5091/6711>

Additional considerations

- Recommended paper length is ten (10) pages. If authors require more pages, they should inform the Editor in advance during the submission process.
 - The result of the review process and the reviewers comments would be notified to the authors through the OJS platform and by email to the correspondence author. The result can be “Major correction”, “Minor corrections” or “Rejected”. When corrections are required, authors should resubmit a corrected anonymous manuscript and a companion document explaining the changes made in reply to what comments. Usually, a submitted manuscript would undertake at least two rounds of review. Statistics of average review and production times and other Journal indicators can be seen at:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/index>
 - When a submission does not meet the conditions defined for the journal, the Editorial Committee may decide not to publish it. In this case, the authors will be notified of the decision within two (2) weeks from the date of submission.
- 
- 



Copyright and publishing cost

INGENIERÍA Journal distributes the full content of its printed and digital version under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License. No publication costs are charged to the author or author's institutions, nor any payment are made to expert peer reviewers or associated or adjunct editors. INGENIERÍA Journal is funded by Universidad Distrital Francisco José de Caldas, its School of Engineering and its Central Research Office.

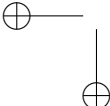
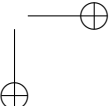
Code of good conduct in scientific publishing

INGENIERÍA Journal advocates and defends the universal principles of good conduct in scientific publication, in particular, those referring to respect for the community, respect for the selfless and voluntary work of peer reviewers and editors, as well as respect to intellectual property. Regarding the latter, INGENIERÍA Journal does not tolerate behaviours related to plagiarism of previously published material and strives to honor to the maximum extent the copyrights and patents and reproduction rights. Likewise, the Journal seeks to observe the moral rights of third parties, in addition it will establish the necessary processes to avoid and to resolve the possible conflicts of interest that can exist in the publications.

Inappropriate behaviour not tolerated by the journal

1. Wrongly addressed submission intended to other journal different to INGENIERIA Journal.
2. Plagiarism or self-plagiarism.
3. Simultaneous submission of a manuscript to several journals.
4. Unjustified withdraw of a submitted manuscript due to unfavourable reviews.
5. Unjustified abandonment of submission at any stage of the process: verification of submission conditions, peer-review process or layout and final proof adjustments.

Penalties for inappropriate behaviour

1. Official communication sent to the authors indicating the misconduct, requesting a letter of apology addressed to the Editorial Committee, Scientific and/or peer reviewers.
 2. Notification sent to the Colombian Network of Engineering Journals (Red Colombiana de Revistas de Ingeniería) reporting the case of misconduct with evidences.
 3. Official communication sent to author's affiliated or financing institutions informing about the misconduct.
 4. Retraction of the paper in case it has been published, notifying this decision publicly in the editorial pages of the Journal and in an official letter addressed to the entities of institutional affiliation of the authors.
 5. Application of a publication veto to the authors in the Journal during a period determined by the Editorial Board according to the seriousness of the misconduct.
 6. Notification of the case and the result of the investigation to the competent authorities, in case the good will of the Universidad Distrital FJC or the INGENIERIA Journal is compromised.
- 
- 



Procedure in case of suspicion of plagiarism and duplicate publication

INGENIERIA Journal will follow the guidelines established by the Publications Ethics Committee (COPE) to handle unethical issues or behaviours:

Suspicion of plagiarism in a submitted manuscript

<http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20A.pdf>

Suspicion of plagiarism in a published paper

http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20B_0.pdf

Suspicion of duplicate publication in a submitted manuscript

<http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20A.pdf>

Suspicion of a duplicate publication in a published paper

http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20B_0.pdf

For more information on non-ethical conduct and/or penalties please see:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/7784/11818>

