



# REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL

ISSN: 1390-0129  
eISSN: 2477-8990  
Volumen 53, Nro. 1, Febrero · Abril 2024



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL



**EPN**  
*editorial*

[revistapolitecnica.epn.edu.ec](http://revistapolitecnica.epn.edu.ec)  
[www.epn.edu.ec](http://www.epn.edu.ec)



# REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL

ISSN: 1390-0129  
eISSN: 2477-8990  
Volumen 53, Nro. 1, Febrero · Abril 2024



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL



REVISTA  
POLITÉCNICA



**EPN**  
*editorial*

[revistapolitecnica.epn.edu.ec](http://revistapolitecnica.epn.edu.ec)  
[www.epn.edu.ec](http://www.epn.edu.ec)

## TEMÁTICA Y ALCANCE

La Revista Politécnica es una publicación periódica trimestral editada por la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, creada en el año 1961, siendo la primera revista científica ecuatoriana, cuyo objetivo es contribuir al conocimiento científico y tecnológico, mediante la publicación de estudios científicos relacionados con las áreas de ciencias básicas (Física, Química, Biología y Matemática) e ingenierías (Química y Agroindustria, Civil y Ambiental, Eléctrica y Electrónica, Geología y Petróleos, Mecánica, y Sistemas). La Revista Politécnica está dirigida a profesionales e investigadores que trabajan en estos campos del conocimiento.

### EDITORIA

Jenny Gabriela Torres, Ph.D.  
*Escuela Politécnica Nacional*  
editor.rp@epn.edu.ec

### CO-EDITOR

Benjamin Bernard, Ph.D.  
*Escuela Politécnica Nacional*  
coeditor.rp@epn.edu.ec

### CONSEJO EDITORIAL

Ph.D. José Aguilar  
*Universidad de los Andes, Venezuela*

Ph.D. Víctor Hugo Hidalgo  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

Ph.D. José Luis Paz  
*Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú*

Ph.D. Hernán Álvarez  
*Universidad Nacional Colombia, Colombia*

Ph.D. Majid Khorami (C)  
*Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador*

Ph.D. Nelson Pérez  
*Universidad de los Andes, Venezuela*

Ph.D. Santiago Arellano Chalmers  
*University of Technology, Suecia*

Ph.D. Hugo Leiva  
*Yachay Tech University, Ecuador*

Ph.D. Franklin Rivas  
*Universidad Técnica Federico Santamaría, Chile*

Ph.D. Carlos Ávila  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

Ph.D. Francisco León  
*Universidad de los Andes, Venezuela*

Ph.D. Andrés Rosales  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

Ph.D. Leonardo Basile  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

Ph.D. Orestes Llanes  
*Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba*

Ph.D. Gabriel Salazar  
*Organización Latinoamericana de Energía, Ecuador*

Ph.D. Silvia Calderón  
*Finnish Meteorological Institute, Finlandia*

Ph.D. Wilfrido A. Moreno  
*University of South Florida, Estados Unidos*

Ph.D. Gustavo Scaglia  
*Universidad Nacional de San Juan, Argentina*

Ph.D. Eduardo F. Camacho  
*Universidad de Sevilla, España*

Ph.D. Diego Ordóñez  
*Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador*

Ph.D. Hebert Sira-Ramirez  
*Center for Research and Advanced Studies of the National Polytechnic Institute, México*

Ph.D. Juan Carlos De los Reyes  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

Ph.D. Rui Pedro Paiva  
*University of Coimbra, Portugal*

Ph.D. Sebastián Taco  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

Ph.D. Pamela Flores  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

La Revista Politécnica está incluida en diferentes índices, siendo los principales SCOPUS, Scientific Electronic Library Online (SciELO), Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal (Redalyc), Catálogo 2.0 de Latindex, Directory of Open Access Journals (DOAJ).

Se autoriza la reproducción total o parcial de su contenido siempre y cuando se cite la fuente. Los conceptos expresados son de responsabilidad exclusiva de sus autores.

#### *Coordinador Técnico Operativo*

Ing. Ricardo Villarroel  
ricardo.villarroel@epn.edu.ec

MSc. Karina Játiva  
karina.jativa@epn.edu.ec

#### *Proofreader*

MSc. María Eufemia  
Torres

#### *Diseño de Portada*

Cristian Basurto  
Diseñador Gráfico

## AUTORIDADES

### ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**Vicerrector de Investigación,  
Innovación y Vinculación**  
Marco Santórum, Ph.D.

**Rector**  
Tarquino Sánchez, Ph.D.

**Vicerrectora de Docencia**  
Valentina Ramos, Ph.D.

## **En la ciencia, la belleza reside en los detalles**

La atención meticulosa a los detalles no solo es el pilar fundamental del método científico, sino también una fuente continua de contribución y avances para la sociedad. La ciencia, como una construcción compleja con múltiples ramificaciones, se encuentra en constante evolución. Cada hecho científico no es simplemente una afirmación; más bien, representa el resultado de innumerables estudios, experimentos y demostraciones que buscan entender y explicar la complejidad del mundo que nos rodea.

La rigurosidad en la ciencia se manifiesta en el proceso de elevación de una hipótesis al estatus de teoría. Este proceso no es meramente un trámite; implica un escrutinio exhaustivo por parte de expertos en el campo. La revisión por pares, un fundamento esencial en la metodología científica, garantiza la calidad y validez de los hallazgos. Además, una teoría no se erige sobre la base de un solo estudio, sino que requiere el respaldo de un conjunto diverso de observaciones independientes, consolidando así su credibilidad y aplicabilidad.

La atención a los detalles, por tanto, se convierte en un faro que guía a los científicos a través del vasto océano del conocimiento, asegurando que cada pieza del rompecabezas encaje con precisión. Este enfoque meticuloso, además de fortalecer la base del conocimiento científico, también abre la puerta a nuevas posibilidades y avances. En última instancia, es esta minuciosidad la que permite a la ciencia comprender nuestro mundo, así como ofrecer soluciones innovadoras y transformadoras para los desafíos de la sociedad.

Partiendo de esta filosofía, la Revista Politécnica presenta en este nuevo volumen 10 artículos correspondientes a los campos de la ingeniería eléctrica, la química, los sistemas, las matemáticas y las ciencias ambientales, que proponen nuevas soluciones o perspectivas para resolver problemas de la sociedad, como el consumo eléctrico, la detección de minas antipersona o la construcción de edificios sísmo-resistentes. La optimización de los recursos, la lucha contra la contaminación ambiental y la gestión de riesgos son temas recurrentes que deben abordarse con esta atención al detalle.

El consejo editorial de Revista Politécnica agradece especialmente a los autores y revisores su atención al detalle, que hace que los artículos aquí presentados sean relevantes para nuestros lectores y piezas importantes en el rompecabezas de la ciencia. Por nuestra parte, nos comprometemos a seguir elevando los estándares de calidad de la publicación científica tanto a nivel nacional como internacional.

## **In science, the beauty lies in the details**

Meticulous attention to detail is not only the cornerstone of the scientific method, but also a continuous source of contribution and advancement for society. Science, as a complex construct with multiple ramifications, is constantly evolving. Each scientific fact is not simply a statement; rather, it represents the result of countless studies, experiments and demonstrations that seek to understand and explain the complexity of the world around us.

Rigor in science is manifested in the process of elevating a hypothesis to the status of a theory. This process is not merely a formality; it involves exhaustive scrutiny by experts in the field. Peer review, an essential foundation in scientific methodology, guarantees the quality and validity of the findings. Moreover, a theory is not built on the basis of a single study, but requires the support of a diverse set of independent observations, thus consolidating its credibility and applicability.

Attention to detail, therefore, becomes a beacon that guides scientists through the vast ocean of knowledge, ensuring that each piece of the puzzle fits precisely. This meticulous approach, in addition to strengthening the scientific knowledge base, also opens the door to new possibilities and breakthroughs. Ultimately, it is this thoroughness that enables science to understand our world, as well as to offer innovative and transformative solutions to societal challenges.

Based on this philosophy, the Revista Politecnica presents in this new volume 10 articles corresponding to the fields of electrical engineering, chemistry, systems, mathematics and environmental sciences, which propose new solutions or perspectives to solve societal problems, such as electricity consumption, landmine detection or the construction of earthquake-resistant buildings. The optimization of resources, the fight against environmental pollution and risk management are recurring themes to be addressed with this attention to detail.

The editorial board of Revista Politecnica is especially grateful to the authors and reviewers for their attention to detail, which makes the articles presented here relevant to our readers and important pieces in the puzzle of science. For our part, we are committed to continue to raise the quality standards of scientific publishing both nationally and internationally.

**Contenido**  
**Vol. 53, No. 1**  
**Febrero - Abril 2024**

7

Pérez, Maykop; Ramos, Josnier; Rodríguez, José Antonio; Pérez, Cristian

**Software for Electric Demand Control from Scilab**

*Software para el Control de la Demanda Eléctrica a partir de Scilab*

21

Penagos Paz, Hernán; Blanco Gómez, Cristian

**Design and Simulation of a Log-Periodic Fractal Antenna for the Detection of Plastic Mines**

*Diseño y Simulación de una Antena Fractal Log-Periódica para la Detección de Minas de Plástico*

31

Oscullo, José 1; Jumbo, Roberto; Otero, Patricia 1

**Herramienta Computacional para Determinar los Residuos de Sistemas Eléctricos de Potencia**

*Computational Tool to Determine the Residues of Electrical Power Systems*



39

Ahmed, Hanan H.; Mohamme, Salim A.

**Development of Spectrophotometric Method to Assay Phenylephrine Hydrochloride in Pure and in its Pharmaceutical Forms Using Diazotized Sulphanilic Acid**

*Desarrollo de un Método Espectrofotométrico para Analizar el Clorhidrato de Fenilefrina en Forma Pura y Farmacéutica Utilizando Ácido Sulfanílico Diazotizado*

47

Naranjo, Juan; Palmay, Paul; Jaramillo, Kerly

**Uso de un Catalizador Regenerado de la Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado para el Reciclaje Químico mediante Glicólisis del Poli-(Tereftalato de Etileno)**

*Use of a Regenerated Catalyst from Fluid Catalytic Cracking for the Poly- (Ethylene Terephthalate) Chemical Recycling via Glycolysis*

57

Mieles Toloza, Ismael; Delgado Meza, Jesús; Acevedo-Suárez, Johana

**Análisis del Lenguaje Natural para la Identificación de Alteraciones Mentales en Redes Sociales: Una Revisión Sistemática de Estudios**

*Natural Language Analysis for the Identification of Mental Disturbances in Social Networks: A Systematic Review of Studies*

73

Aro Huanacuni, Alex; Santander Mamani, Oscar

**Eficiencia de la Iteración de Newton de Orden 3, en la Solución Numérica por el Método de Disparo**

*Efficiency of Newton's Iteration of Order 3, in the Numerical Solution by the Shooting Method*

83

Ulcuango, David; Haro, Ana Gabriela

**Evaluación del Desempeño Sísmico de un Sistema Dual de Hormigón Armado con Diferentes Niveles de Irregularidad Torsional**

*Evaluation of the Seismic Performance of a Dual Reinforced Concrete System with Different Levels of Torsional Irregularity*

99

Caicedo, Máximo; Villegas, Luis; Arriola, Guillermo; Cayatopa, Royser; García, Juan; Marín, Noe

**Generation of Flows Applying a Simple Method of Flood Routing to Monthly Level in La Leche Basin, Peru**

*Generación de Caudales Aplicando un Método Simple de Tránsito de Avenidas a Nivel Mensual en La Cuenca La Leche, Perú*

111

Pérez-Sane, Monica; Torres, Camilo; Lara-Borrero, Jaime

**Estimación, Manejo y Control de la Contaminación No Puntual por Escorrentía Superficial Ganadera: Una Revisión de literatura**

*Estimation, Management, and Control of Non-Point Source Pollution from Livestock Runoff: A Literature Review*

# Software for Electric Demand Control from Scilab

Pérez, Maykop<sup>1</sup> ; Ramos, Josnier<sup>1,\*</sup> ; Rodríguez, José Antonio<sup>1</sup> ; Pérez, Cristian<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Centro de investigaciones y pruebas electroenergéticas, Universidad tecnológica de la Habana, Habana, Cuba

**Abstract:** At present, as energy resources are increasingly scarce, it is necessary to apply a highly efficient savings policy. In this context, it is essential to study and analyze electrical systems, mainly supply systems in production and service facilities. It is important to point out that in peak electricity hours, even the least efficient generating machines have to work, increasing oil consumption per kWh generated; on the other hand, there are great difficulties in transferring power from different generating units to the places where electricity is consumed in those critical hours. Therefore, when the energy demand is not in correspondence with the generation of the generating plants, it is then necessary to interrupt some loads, producing the well-known blackouts and, consequently, the inconvenience and affectations of the users of the electrical service, it is in these cases where the need for electric charge accommodation becomes evident. Therefore, this article aims to propose an application to accommodate loads in industrial systems, through a graphical interface, based on the free software Scilab, which among other things allows load accommodation considering the installation or not of a photovoltaic system. To verify its usefulness, the UEB Pinturas Vitral located in the municipality of San José de las Lajas, Mayabeque Province, Cuba, has 2 work shifts.

**Keywords:** Accommodate loads, demand control, power quality, industrial systems, Scilab, teaching-learning process

## Software para el Control de la Demanda Eléctrica a partir de Scilab

**Resumen:** En la actualidad, como los recursos energéticos escasean cada vez más, se hace necesario aplicar una política de ahorro de suma eficiencia. En este contexto, es imprescindible el estudio y análisis de los sistemas eléctricos, fundamentalmente los sistemas de suministros en instalaciones de producción y servicios. Es importante señalar que, en las horas del pico eléctrico, hasta las máquinas generadoras menos eficientes tienen que funcionar incrementándose el consumo de petróleo por kWh generado, por otra parte, se presentan grandes dificultades para transferir la potencia de diferentes unidades generadoras hacia los lugares donde es consumida la electricidad en esas horas críticas. Por lo tanto, cuando la demanda de energía no está en correspondencia con la generación de las plantas generadoras es necesario entonces interrumpir algunas cargas, produciéndose los conocidos apagones y, por consiguiente, la molestia y afectaciones de los usuarios del servicio eléctrico, es en estos casos que se hace evidente la necesidad del acomodo de carga eléctrica. Por lo que el presente artículo tiene como objetivo proponer una aplicación para realizar el acomodo de cargas en los sistemas industriales, mediante una interfaz gráfica, basada en el software libre Scilab, la cual entre otras cosas permite realizar el acomodo de cargas teniendo en cuenta la instalación o no de un sistema fotovoltaico. Para comprobar su utilidad se toma como caso la UEB Pinturas Vitral ubicada en el municipio de San José de las Lajas, Provincia Mayabeque, Cuba, que posee 2 turnos de trabajo.

**Palabras clave:** Acomodo de cargas, control de la demanda, calidad de la energía, sistemas industriales, Scilab proceso de enseñanza – aprendizaje

### 1. INTRODUCTION

One of the most notorious advances of today's society is the development of technology, with the consequent increase in the demand for electrical energy, in its different forms, establishing a progressive complexity of electrical power systems in terms of generation, transmission, subtransmission

and distribution of energy and, therefore, reconsider mechanisms to reduce electrical energy losses and thus have more efficient power electrical systems.

In this sense, Acevedo & Pimentel (2014), Reinoso & Salazar (2017) and Pérez, García & Díaz (2020) affirm that electricity is a public service, that is available all the time, in most places and that has a wide range of applications. Since it cannot be stored on a large scale, it is generated at the same time and in the same amount that is consumed and has to be transmitted instantly from generation to consumer through transmission lines. As a consequence of these special characteristics, the electric power system must be designed to satisfy the maximum expected demand. Furthermore, depending on the type of generating plants that are in

\*josnier@electrica.cujae.edu.cu  
Recibido: 16/07/2023  
Aceptado: 15/11/2023  
Publicado en línea: 09/02/2024  
10.33333/rp.vol53n1.01  
CC 4.0

operation at different times of the day, the production efficiency and the cost of fuel burned in thermal plants can change significantly.

In addition, electrical energy losses are common and inherent to electrical companies and often become a serious problem when they exceed certain logical and pre-established limits. These increase the consumption of total electricity generation; therefore, it is necessary to generate more, with the consequent loss of energy resources. Energy losses are an indicator of efficiency of any electrical energy system.

For example, Fernández (2017) emphasizes that in Spain these losses represent approximately 8.9% of the energy in the network, in the United Kingdom, the losses are 7.92%, in Germany 6.74%, in France 5.40%, Austria 6.29%, the United States 6.29% and Australia 5.06%.

According to statements from the Ministry of Energy and Mines and the studies of Cruz, Escalante & Pérez (2021), as a whole, in Cuba, the losses in the transmission and distribution systems represent 14.45% of the total electrical energy produced. Typically, the losses are approximately 3.5% in the transmission system and 10.95% in the subtransmission and distribution system. These electrical losses vary according to the configuration of the network, determined by the location and production of the generators, the location and demand of the clients. In particular, electrical power losses during periods of high demand or on overloaded lines are often much higher than under lower load conditions. This is because there is a quadratic relationship between the electrical losses and the current flow in the line.

In correspondence, Horta (2007), Morales, Alvarado & González (2021) and Dávila, Trujillo & Jaramillo (2022) assure that it is important to classify the most common causes that make electrical systems to be inefficient, essentially, they are associated into four groups:

- Deficient design: due to a misconception from a design point of view, materials, manufacturing process, equipment and/or systems lead to wastage of electrical energy, for example, the use of inefficient light bulbs or their use of wrong way before the principles of the rational use of energy;
- Inefficient operation: even when electrical power systems are well designed, they can be operated irresponsibly, for example, keeping an idle room unnecessarily lit;
- Inadequate maintenance: a part of the electrical losses could be minimized through adequate corrective and preventive maintenance procedures, which includes the correct adjustment and control of the systems, so that they maintain, as far as possible, the performance of the conditions originals.
- Operation of loads during peak hours: when all loads operate at times when the kWh cost is higher, losses in energy generation are caused.

In this sense, Ojeda (2010) and Borges, Puch & Frías (2017) state that it is of vital importance in the current economic situation of any country to reduce the costs associated with the consumption of electrical energy and with the capital investments in the electrical equipment used in the industrial and service facilities. In addition, this need is enhanced by the environmental impact of the dominant energy technologies.

As already mentioned, the levels of electrical losses constitute an important measure of efficiency and financial sustainability of the electrical sector. The losses in the transmission of energy are a reflection of the level of efficiency of the infrastructure in the transmission and distribution of electrical energy. Electricity delivered but not billed, which translates directly into financial losses and serves as an indicator of the operational performance of electric companies, is also closely linked to the concept of electric losses.

Therefore, reducing the levels of electricity losses can contribute to achieving the objective of universal access to modern energy sources, and would translate into additional income for electricity companies with consequent improvements in cost recovery and financial sustainability. In the medium term, they would contribute to improving the capitalization of the electricity sector and its investment capacity.

Also, as Pérez, Santos & Llamo (2021) state that the reduction in loss levels would imply a decrease in greenhouse gas emissions, as well as a reduction in electricity rates for the final consumer. The increase in billing would not only increase the income of the electricity sector, but would also send a signal to the market to discourage excessive consumption and encourage energy conservation practices.

The analyzes show that, if high growth and development prospects are to be achieved, great attention must be paid to reducing energy losses and improving energy efficiency in companies, industries, public institutions and for all energy actor players. In this context, it is absolutely essential to promote and monitor government programs to consistently evaluate actions and estimate results.

There are different measures to consider for savings in electrical systems of industrial or service companies. One of the most used is the control of the maximum demand (MD) and the consumption of electrical energy.

Authors such Cañizares, Rivero, Pérez & González (2014), Hurtado & Escamilla (2015), Borges, Puch, & Frías (2017), Luben (2020) and Álvarez, Montelíer, Oviedo & Bello, (2021) suggest that carrying out a good control of the maximum demand and the consumption of electrical energy, by manual or automated methods, allows to reduce the costs associated with consumption by means of guaranteeing a lower energy expense in peak hours where the value of the electric power is higher, the reduction of transformation losses, the reduction of the payment for maximum demand if the tariff considers this aspect, as well as the improvement of the system's operability in general.

In addition, the authors themselves refer that effective control makes it possible to determine optimal investment policies in the electrical system, in order to guarantee greater security and quality of electrical supply.

On the other hand, Rey (2013) and Borges, Puch & Frías, (2017) argue that, in Cuba, the residential sector represents approximately 50% of energy consumption at the country level. For this reason, the hours of greatest demand are recorded between 5:00 p.m. and 9:00 p.m. and the electricity tariff system establishes for its main clients, higher costs of the energy consumed in this period, considered as peak hours, for which displaces the loads towards other periods of the day, mainly at dawn. This produces a considerable

decrease in the national maximum demand and increases the minimum, called valley, which is also beneficial, since the cost of energy production is much lower at that time while allowing greater stability to the electrical energy system.

Correspondingly, according to Luben (2020), the National Office for the Control of the Rational Use of Energy insists on the need to increase savings in electricity consumption, especially during times of maximum demand in Cuba, where the generation is from diesel. Therefore, it is necessary to activate the managers of the companies to carry out load accommodations, which consists of establishing the operating itinerary of the auxiliary receivers, in such a way that minimum energy consumption is obtained during peak hours, with minimum demand, maximum and minimum discontinuity of the chronological load curve, thus helping to save electricity in the country.

In this sense, the study of electrical load accommodation constitutes a manual demand control procedure that can be modeled by means of an optimization problem with a discrete search space, which allows knowing the behavior of the connected load, its working regime and the hours in which the different loads coincide. With these elements, the company can establish its limits of demands and consumption at the different hours of the day, elaborated on technical bases and in accordance with its real possibilities.

Consequently, when analyzing the way to put load accommodation into practice, care must be taken not to affect production and study the different variants that allow consumption to be transferred from peak hours to other more appropriate hours.

Traditional methods for this type of problem do not ensure an effective solution since in most cases they are based on empirical criteria.

Based on the above, the objective of this research is to implement in the free software Scilab a program with a graphical interface that allows the analysis of the arrangement of electrical charges in industrial systems and in turn provide energy engineers with a tool to educate themselves on the subject. As a case study to validate the proposal was taken the Company *Pintura Vitrales* located in San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba.

## 2. MATERIALS AND METHODS

In order to develop the objective of this research, it was necessary to verify existing theoretical studies and search for accumulated scientific knowledge regarding the analysis of demand control in industrial electrical systems and the use of free professional software. For which, it was consulted a total of 14 bibliographical references, in addition to catalogs and technical standards, which allowed together with the case study to develop the application proposed here using the methodology presented in the conceptual map of Figure 1. Correspondingly, for a better understanding of the algorithm programmed in Scilab, a flow chart is shown in Figure 2 where the input variables and the results of the proposal are explained.

The software used for the proposal through simulation is the free software Scilab, which incorporates a large group of packages for scientific computing, mainly oriented to

numerical calculation, to matrix operations that are very useful for the development of engineering applications.

While it is possible to use it simply as a calculator, its potential lies in the hundreds of built-in functions and its graphical capabilities. It is, in itself, its own programming language, which allows us to use libraries from other languages through an intermediate layer of software. It is very close to high-level languages such as Fortran, C and similar, giving users the possibility of developing their own scripts.

It should be noted that within the benefits of the software is the development of simulations from the creation of scripts for the programs, functions or own libraries, in the simulation that is proposed the benefits used from the graphical environment through a graphical interface.

In this sense, the methodology used was successive iterations based on the selection of the schedule to carry out the load adjustment and the desired load factor.

## 3. DISCUSSION AND RESULTS

As already mentioned, the accommodation of electrical charges is legally required of older consumers and constitutes a source of saving energy and financial resources. This procedure has as objectives the smoothing of the load graph, the reduction of the demand particularly in the peak hours, the

improvement of the power factor and the reduction of the energy costs through a group of technical and organizational measures of management of the loads.

Its implementation requires a previous study that includes the inventory of all loads, the collection of primary data referring to electricity billing, obtaining the consumption rates that can be applied, the behavior of the power factor and the maximum demand.

The study of load accommodation allows to know the behavior of the connected load, its work regime and the hours in which the different loads coincide, with these elements the companies can establish their limits of demands and consumption at the different hours of the day, elaborated on more technical bases and according to their real possibilities.

The adequate statistical processing and its analysis with the help of chronological curves of daily load and Tables, allow highlighting the most important consumers and discovering regularities, which can help decision making.

### *Chronological load curves and demand factor*

According to what was stated by Pérez, Núñez & Ramos (2022) the preparation of the chronological load curve can be used as one of the tools to characterize the consumption of electrical energy of independent receivers, groups of receivers or an installation in general. Under operating conditions, it can vary arbitrarily over time, considering the requirements of the flow of production or services.

In the solution of most of the problems of the exploitation of electrical systems, load curves are essential. Its use requires measurement during at least one characteristic activity cycle. In this sense, authors such as Pérez, González & Martínez (2013) and Borges, Puch & Frías (2017) define that in an

industrial system, a characteristic activity cycle depends on the type of consumer, for example:

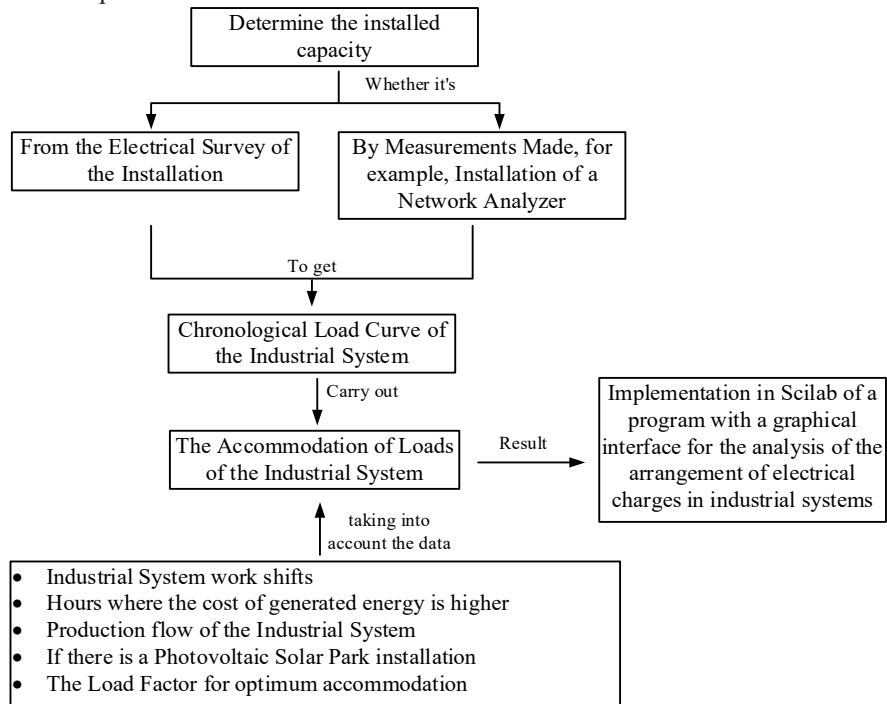


Figure 1. Proposed methodology for the implementation in Scilab of the proposed software (Source: self-made)

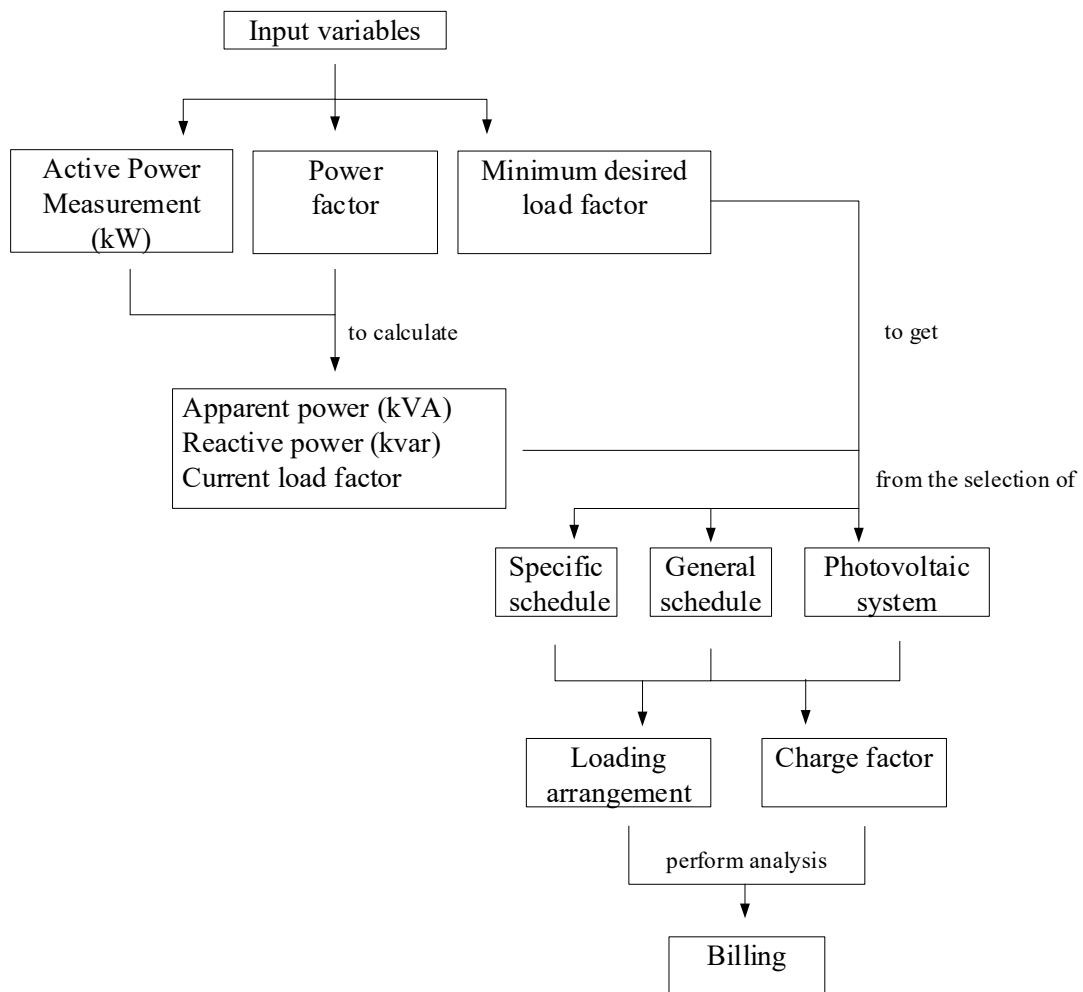


Figure 2. Flowchart of the software implemented in Scilab (Source: self-made)

- For productive entities, such as industries, it is merely the time that elapses from the input of the raw material to the process, until the latest output of production, under normal operating conditions, that is at normal productive capacity and at the time of the year and days of the week where there is traditionally the greatest demand and consumption of electricity. Sometimes the productive entities constantly process their raw material in the different stages of production development. In this case, the cycle can be shortened by taking this aspect into consideration.
- For service entities such as commercial establishments or others, it is the total duration of the services provided at normal availability and at the time of the year and days of the week where there is traditionally the greatest demand and consumption of electrical energy. In this case, the unit of business day, 24 hours, of the entity is almost always sufficient.

Currently, to obtain the chronological load curve, the most suggestive method results from the use of network analyzer instruments, which make it possible to monitor the behavior of the variables that characterize consumption, both permanently and occasionally.

Another important aspect is to determine the load factor (FC) of the installation, it is important to note that if all the electrical devices were to operate at their maximum capacity simultaneously, the maximum demand would be equal to the connected load. Experience shows that the actual maximum demand of a consumer is less than the connected load because all electrical appliances never operate at full load at the same time, so it can be defined mathematically in terms of power as shown in Equation 1:

$$FC = \frac{\text{Average demand}}{\text{Maximum demand}} \quad (1)$$

Being less than or equal to one because all electrical devices never operate at full load at the same time.

In this sense, it is important to highlight that, for groups of receivers, this coefficient is an indicator of the discontinuity of the chronological load curve, since to the extent that it is greater, close to unity, the group regime of operation of the receivers expresses more continuous operation at that level, which is not always, means each running continuously, but can be used to indicate an operating regime accommodation.

Therefore, the greater the difference between demand and minimum demand, the less use will be made of the installed capacity of the industrial system.

In correspondence, the problem statement is that from a graph of hourly active power basis of a cycle of activity characteristic of a company, move the operation in time of the auxiliary electrical receivers, so such that minimum energy consumption is obtained during peak hours, with minimum maximum demand and minimum discontinuity of the daily load chronological curve. Therefore, we want to minimize the inverse of the coefficient of load desired by the user

### *Presentation of the design of the developed application*

Based on the previous analysis and taking as reference the investigations of Pérez, López & Ramos (2021) and Ramos, Pérez & Silvério (2023), it was developed in the free software Scilab version 6.1.1, the Application of Load Accommodation in Industrial Systems for its first version, which aims to provide a work tool, from simulation, for electrical engineers in industries, allowing them to carry out load accommodation, and thus be able to be implemented.

Figure 3 shows the graphical interface of the application where a column is shown with the hours of the day and the other two columns correspond to the company data.

It should be noted that the application shows a set of data by default, which can be edited in correspondence with the analysis of the industrial electrical system to which the load accommodation is going to be carried out, these are:

- P(kW): Power in kW that must be taken during each hour of the day at the Industrial System meter or by installing a network analyzer.
- fp(pu): It is the power factor recorded in each measurement.

In addition, the application allows carrying out load accommodation analysis with or without the incorporation of a photovoltaic system. It also provides the possibility of carrying out load accommodation from a minimum load factor selected by the user.

Once the data of the industrial system has been updated, the engineer must press the Calculate Load Factor button, showing the window of Figure 4. In this, it can be seen that the application shows the calculation of the current load factor of the Industrial System and informs the user if the load must be accommodated or not, making it possible to choose the time in which the load accommodation will take place.

In the event that the user chooses to accommodate loads at a specific time, the application allows them to make this selection, which can be the hours in which the entity where the study is carried out, works or the electrical peak hours predefined by the electrical power system.

It is important to point out, by way of summary, that within the practical potentialities that the application presents are:

- Carry out load adjustment based on the daily load chronological curve, allowing the user to select the time in which he wants the load adjustment to be carried out.
- Once the load accommodation is done, it shows the chronological curve of daily load before and after the accommodation.
- Provides the possibility of carrying out the same study, but now with the inclusion of photovoltaic solar panels.
- Based on the billing studies carried out by Pérez, Santos & Llamo (2021), the application suggests after the study has been carried out, whether or not the maximum demand should be contracted and provides a value for its re-contracting.

- On the other hand, it executes an analysis of savings for electricity billing after carrying out the accommodation of loads.

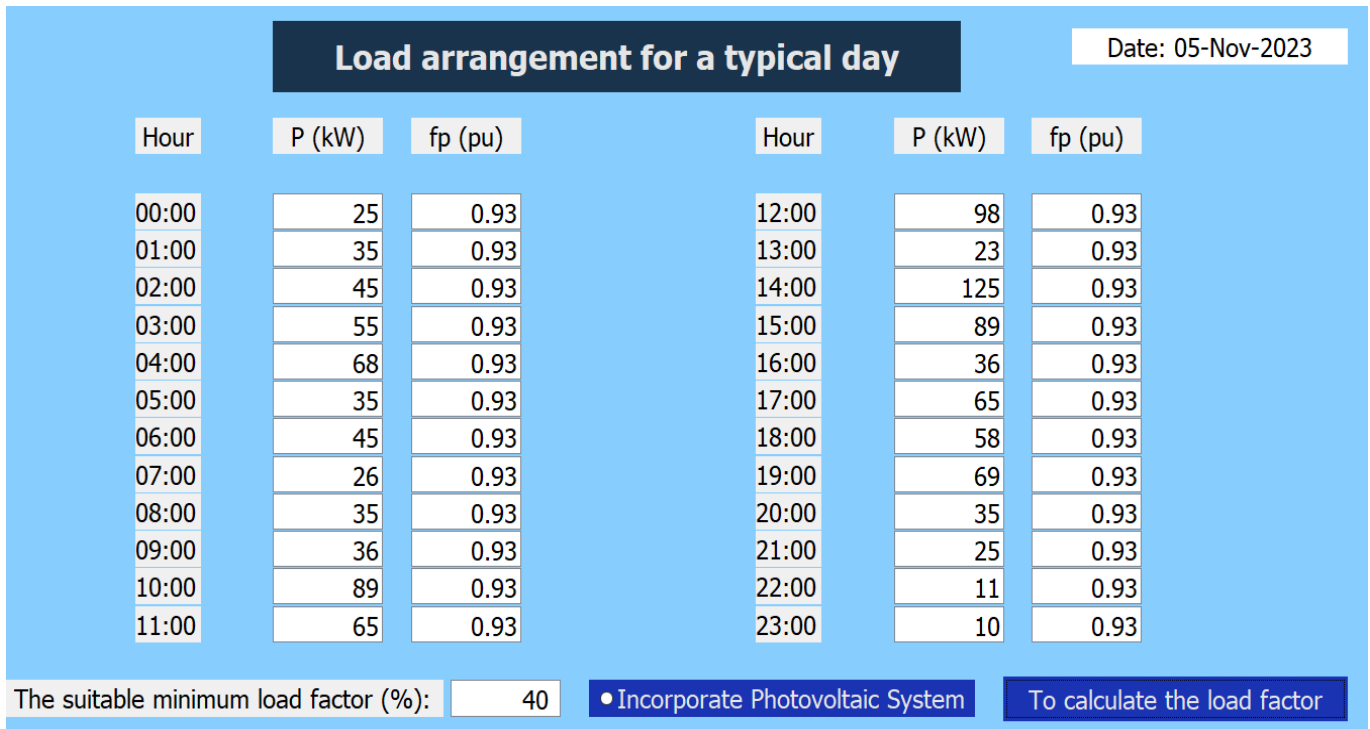


Figure 3. Graphical interface of the Load Accommodation in Industrial Systems application (Source: self-made)

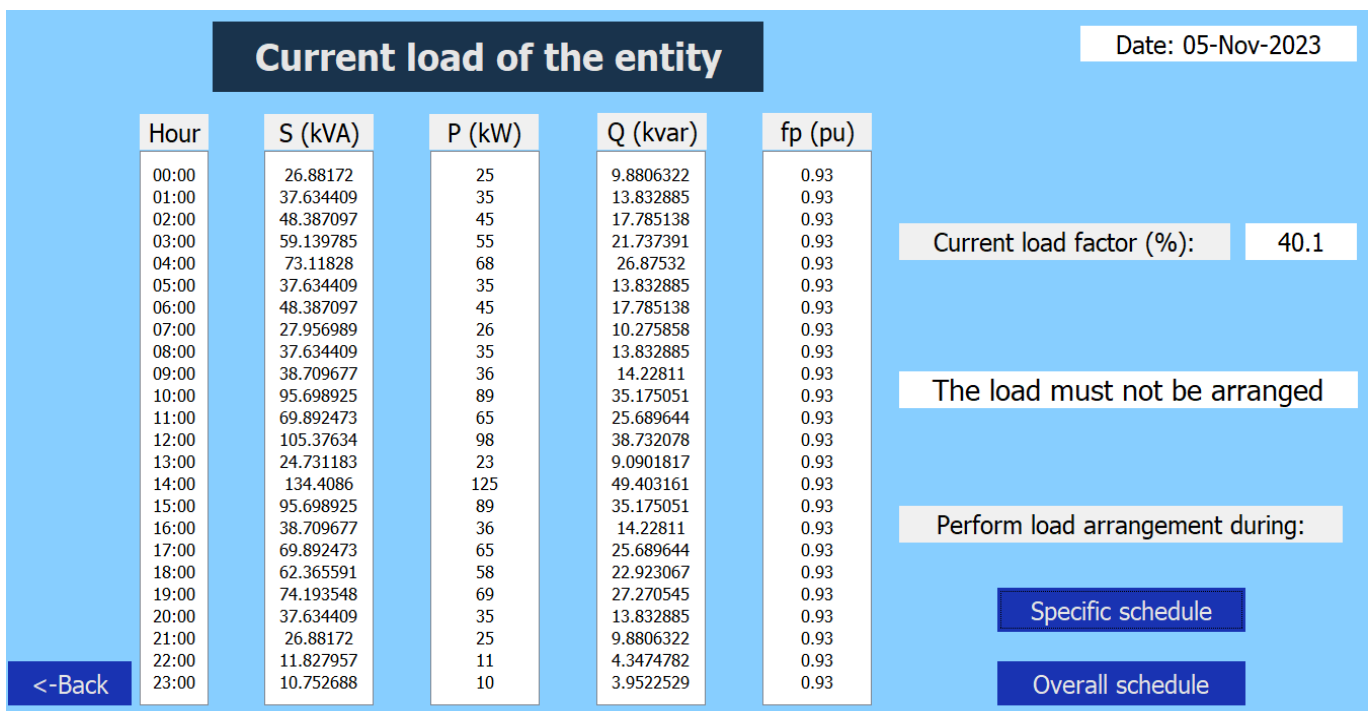


Figure 4. Graphical interface of the Load Accommodation in Industrial Systems application with the calculation of the demand factor (Source: self made)

Validation of the application from the case study

In order to verify the usefulness of the tool, it will be applied to the industrial system of the UEB Pinturas Vitral located in the municipality of San José de las Lajas, Mayabeque

province, which has 2 work shifts, one of 24 hours, which is the resin plant - varnishes and another 8 hours that is the painting plant.

From the installation of a network analyzer, it was possible to obtain the data shown in Table 1.



**Table 1.** General data of the UEB

|                      | Value  | Unit de measurement |
|----------------------|--------|---------------------|
| Total active power   | 331.81 | kW                  |
| Total reactive power | 210.68 | kvar                |
| Apparent power       | 355.96 | kVA                 |
| Power factor         | 0.93   | -                   |
| Connected Load       | 524.72 | kW                  |
| Capacitor bank       | 81.80  | kvar                |
| Maximum demand       | 252.0  | kW                  |
| Charge factor        | 37.74  | %                   |

Obtaining the chronological curve of daily load before carrying out the load accommodation, the maximum demand occurs at 11:00 am.

Based on these values and considering that the peak hours of the Cuban Electroenergetic System are from 11:00 a.m. to 1:00 p.m. and from 6:00 p.m. to 10:00 p.m., the application is used to carry out load accommodation in three (3) variants, it should be noted that an adequate minimum load factor of 50% was chosen for all variants:

- **Variant # 1:** considering only peak hours from 11:00 a.m. to 1:00 p.m.
- **Variant # 2:** considering the peak hours from 6:00 pm to 10:00 pm
- **Variant # 3:** considering 24 hours a day.

Table 2 shows the summary results for each of the variants. It should be clarified that the minus sign in the comparative values of the maximum demand means that there was a reduction in it.

**Table 2.** Summary for each variant of load accommodation

|              | Maximum demand (kW) | Charge factor | Percentage MD FC |      |
|--------------|---------------------|---------------|------------------|------|
| Actual state | 252.0               | 37.74         | -                | -    |
| Variant # 1  | 245.0               | 38.35         | -2.7             | 1.6  |
| Variant # 2  | 252.0               | 37.74         | 0.0              | 0.0  |
| Variant # 3  | 190.0               | 50.01         | -24.6            | 32.5 |

As can be seen, the best variant is variant # 3 since it is possible to reduce the maximum demand by 24.6% and increase the load factor by 32.5%.

For which it was necessary to move 234 kW from the time between 09:00 and 12:00, distributed in, 104 kW for the time between 00:00 and 06:00 and 130 kW for the time between 17: 00 hours and 23:00 hours respectively, as shown in Figure 1 of the annexes highlighted in red.

On the other hand, in the other two variants analyzed almost no significant changes were obtained.

Based on these results and the entity's own production flow, the following recommendations are made:

- It is recommended that all air conditioners be turned on from 8:00 a.m. to 11:00 a.m. and from 1:00 p.m. to 4:00 p.m. in order to reduce the peak between 11:00 a.m. and 1:00 p.m.
- The ball mills work 16 hours a day, but to eliminate their influence during peak hours, they start working at 2:00 pm, they are disconnected from 6:00 pm to 10:00 pm, until 6:00 am, thus achieving that they do not influence peak hours.

- It is recommended that all equipment that is on unnecessarily be turned off, especially during peak hours.
- Based on the load accommodation study, it is recommended to analyze the recontracting of the maximum demand to reduce this and thus, save a budget for billing.

In addition to the results shown, as already mentioned, the application offers the option of graphing the chronological curve of daily load before and after carrying out the load adjustment, these results are shown in Figures 2 of the annexes.

Now, to carry out the billing studies, the user must select the rate to which the industry is subject, in this case it is the M1-A. It is important to note that in this first version of the application they have implemented four types of rates according to the current resolutions.

Once the rate is selected, the engineer must provide the software with the maximum contracted demand and the K factor, which is expressed as a coefficient whose value reflects the proportion in which the weighted average of the prices of all fuels occurs, in this case it is equal to 4.2143.

The result obtained from the billing study, when carrying out the run with the application, was that it is recommended to recontract the demand to 229.0 kW, which will mean a saving for fixed charge of 23.67%.

On the other hand, with the objective of demonstrating the potential of the application to conduct studies on the installation of photovoltaic solar panels and to know how these will influence the load accommodation of the industry, the same study will be carried out, but now with the inclusion of solar panels.

If, when carrying out the load arrangement, the item incorporate photovoltaic system is selected, showing the direct irradiance and diffuse irradiance data obtained from the web page: <https://www.renewables.ninja/> and it is loaded in an Excel file from which the app takes the data.

In addition, the application requests as additional data the efficiency of the panels to be installed as well as the area occupied by them and their form factor.

As a summary, Table 3 shows the effect that the inclusion of solar panels has on the industrial system.

**Table 3.** Comparative summary of the current state and the inclusion of solar panels

|                   | Maximum demand (kW) | Charge factor | Percentage MD FC |      |
|-------------------|---------------------|---------------|------------------|------|
| Actual state      | 252.0               | 37.74         | -                | -    |
| with solar panels | 184.0               | 50.02         | -27.0            | 32.5 |

In addition, with the inclusion of the panels, the application recommends that the maximum demand be recontracted to 220.0 kW, which represents a saving of 26.33% for fixed charge.

As additional data, the application provides the daily load curve of the photovoltaic solar panels, as shown in Figure 3 of the annexes.

To compare the results obtained, five (5) electrical engineers were consulted with the aim of assessing the usefulness of the

software as useful, moderately useful or not useful, the results are shown in Figure 4 of the annexes.

As can be seen, the application is considered useful by 80.0% of the specialists consulted and only one that represents 20.0% of those consulted refers to "modernly useful" because he considers that improvements could be made to the application in the future in terms of the inclusion of analysis of power factor and billing, in addition that it should be shown as soon as the maximum demand of the company decreased in a way

more explicit, aspects that will be considered for future versions.

Moreover, with the objective of assessing the utilities from the didactic point of view and how it can help to improve the teaching-learning process of electrical engineering students, 56 4th-year students of the electrical engineering career were interviewed. from the Technological University of Havana, which represent 85% of the current enrollment of the year.

The form that served as a guide for conducting the interview was structured as follows:

**Question No. 1.** In your opinion, do you consider that the proposed application helped you reinforce the theoretical-practical contents, as well as the development of skills?

The responses to this question are shown in Table 4.

|                | Frequency | %     |
|----------------|-----------|-------|
| Yes            | 54.0      | 96.5  |
| No             | -         | -     |
| To some extent | 2.0       | 3.5   |
| Total          | 56.0      | 100.0 |

*Analysis and interpretation:* It is observed that 96.5% of the interviewed students consider that the application developed from the features of the free software Scilab helped them understand the theoretical contents taught in the conferences and to develop practical skills related to the subject of quality energy and load accommodation in industrial systems. On the other hand, only 3.5% state that the activities helped them to some extent, mainly basing it on the lack of skill when carrying out the simulations, an aspect that should be studied in future research to correct it. From these results it can be inferred that the developed application greatly helped improve the teaching-learning process of electrical engineering students.

**Question No. 2.** In your opinion, does the use of the application help you be more motivated by the race?

The responses to this question are show in Table 5.

|                | Frequency | %     |
|----------------|-----------|-------|
| Yes            | 53.0      | 94.6  |
| No             | -         | -     |
| To some extent | 3.0       | 5.4   |
| Total          | 56.0      | 100.0 |

*Analysis and interpretation:* the 94.6% of the students state that the use of the tool helped them be more motivated by the

career, since the theoretical-practical knowledge acquired with the application is applied to real case studies of the profession.

**Question No. 3.** In your opinion, has the use of the application helped you exchange knowledge and skills with your peers?

The responses to this question are shown in Table 6.

|                | Frequency | %   |
|----------------|-----------|-----|
| Yes            | 56.0      | 100 |
| No             | -         | -   |
| To some extent | -         | -   |
| Total          | 56.0      | 100 |

*Analysis and interpretation:* 100.0% of the students emphasize that the use of the proposed application in the resolution of real case studies of the profession helped them to exchange information regarding the decision-making of load accommodation and fostering debate in equipment. This result shows that the integration of information and communication technologies from the conception of learning and knowledge technologies and technologies for empowerment and participation in the teaching-learning process through simulation improve collaborative learning. of students, especially when applied in problematic situations related to the profession.

**Question No. 4.** From the use of the application, do you consider that professional skills were developed?

The responses to this question are shown in Table 7.

|                | Frequency | %     |
|----------------|-----------|-------|
| Yes            | 40.0      | 71.4  |
| No             | -         | -     |
| To some extent | 16.0      | 28.6  |
| Total          | 56.0      | 100.0 |

*Analysis and interpretation:* the 71.4% of the students state that the use of the proposed application in the resolution of real case studies of the profession helped them develop professional skills, since it helped them understand the phenomenon of workload accommodation. In a visual and real way, experience is also gained from the simulation, since it allows selecting the best variant from the technical point of view.

#### 4. CONCLUSIONS

With the completion of this work, it was possible to verify that the tool developed in its first version presents great practical utility for industrial engineers and students, since it not only helps engineers carry out different scenarios before implementing load accommodation of the best variant, but it helps students from their training stage develop technical skills from problem-based learning, which is considered of great practical utility. On the other hand, access to this tool is allowed free of charge, to support a greater reach, of those who cannot afford similar tools.

## REFERENCES

- Acevedo Rueda, Rubén, & Pimentel, José A. (2014). Modelo econométrico para el pronóstico de demanda eléctrica máxima diaria. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 18(70), 4-11. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-48212014000100001&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212014000100001&lng=es&tlng=es).
- Álvarez Cancio-Bello, R. R., Montelíer Hernández, S., Oviedo Regojo, A., & Bello González, O. (2021). Bases para la implementación de un sistema de gestión energética en la UEB ron “Luis Arcos Bergnes” de Cienfuegos basado en la NC-ISO 50001:2019. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(4), 505–511. <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v13n4/2218-3620-rus-13-04-505.pdf>
- Borges Vasconcellos, D., Puch González, P., González, F., & Geovanny. (2017). Control de demanda eléctrica aplicando algoritmos genéticos. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 25(3), 389–398. <https://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v25n3/0718-3305-ingeniare-25-03-00389.pdf>
- Cañizares Pentón, G., Rivero Aragón, M. F., Pérez Bermúdez, R. A., & González Suárez, E. (2014). La gestión energética y su impacto en el sector industrial de la provincia de Villa Clara, Cuba. *Tecnología Química*, 34(1), 11–23. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v34n1/rtq02114.pdf>
- Cruz, B. J., Escalante, O. A., & Pérez, M. M. (2021). El diseño del suministro eléctrico, un estudio de caso. *Pedagogía Profesional*, 19(1), 1-16. [https://www.researchgate.net/publication/349604311\\_El\\_diseño\\_del\\_suministro\\_eléctrico\\_un\\_estudio\\_de\\_caso](https://www.researchgate.net/publication/349604311_El_diseño_del_suministro_eléctrico_un_estudio_de_caso)
- Dávila R., M. A., Trujillo R., C. L., & Jaramillo M., A. A. (2022). Revisión de mecanismos de gestión del lado de la demanda para la gestión de energía en el hogar. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 30(2), 353–367. <https://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v30n2/0718-3305-ingeniare-30-02-353.pdf>
- Fernández García, J. (2017). *Estudio de pérdidas técnicas en las redes eléctricas de distribución* [Universidad Carlos III de Madrid]. [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27368/TFG\\_Jon\\_Fernandez\\_Garcia.pdf](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27368/TFG_Jon_Fernandez_Garcia.pdf)
- Horta Nogueira, L. A. (2007). Uso racional: a fonte energética oculta. *Estudos Avançados*, 21(59), 91–105. <https://www.scielo.br/j/ea/a/FxgpTNNWHFZdw5QfLdGBtFs/?format=pdf&lang=pt>
- Hurtado Aguirre, E., & Escamilla Mejía, J. P. (2015). Modelo de gestión de la demanda energética integral. *Revista Facultad De Ciencias Económicas*, 23(2), 137–147. <https://doi.org/10.18359/rfce.1612>
- Luben Pérez, L. (2020, abril 27). Persisten en Cuba en la necesidad de ahorrar electricidad en horarios de máxima demanda. *Agencia Cubana de Noticias (ACN)*. <http://www.acn.cu/cuba/63926-persisten-en-cuba-en-la-necesidad-de-ahorrar-electricidad-en-horarios-de-maxima-demanda>
- Morales Ramírez, D., Alvarado Lagunas, E., & González Del Ángel, L. J. (2021). Disposición al ahorro de energía eléctrica en los hogares de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 36(2), 533–561. <https://estudiosdemograficosurbanos.colmex.mx/index.php/edu/article/view/2002/pdf>
- Ojeda Sarmiento, J. M. (2010). Controlador digital predictivo de demanda máxima de potencia eléctrica. *Ingeniería Industria*, 28, 111–137. <https://www.redalyc.org/pdf/3374/337428494008.pdf>
- Pérez García, O., González Gómez, S. E., & Martínez, Y. (2013). La gestión energética en el contexto empresarial cubano. *Caribeña de Ciencias Sociales*, 2, 1–15. <https://www.eumed.net/rev/caribe/2013/02/gestion-energetica-contexto-empresarial-cubano.html>
- Pérez Martínez, M., García del Sol, D., & Díaz Alfonso, E. (2020). *Importancia del acomodo de carga en la industria: Un estudio de caso*. Cujae, ISBN: 978-959-261-604-2. [https://www.researchgate.net/publication/344930545\\_Importancia\\_del\\_acomodo\\_de\\_carga\\_en\\_la\\_industria\\_Un\\_estudio\\_de\\_caso](https://www.researchgate.net/publication/344930545_Importancia_del_acomodo_de_carga_en_la_industria_Un_estudio_de_caso)
- Pérez Martínez, M., López Collazo, Z. S., & Ramos Guardaramas, J. (2021). Potencialidades del software scilab en el proceso de enseñanza – aprendizaje de la asignatura de circuitos eléctricos. *Revista Tecnología Educativa*, 6(1), 34–42. <https://tecedu.uho.edu.cu/index.php/tecedu/article/view/259/201>
- Pérez Martínez, M., Nuñez Gálvez, I. B., & Ramos Guardarrama, J. (2022). Estudio para la actualización del coeficiente de demanda para instalaciones hoteleras. *Pedagogía Profesional*, 20(3), 1–10. [https://www.researchgate.net/publication/368155652\\_Estudio\\_para\\_la\\_actualizacion\\_del\\_coeficiente\\_de\\_demanda\\_para\\_instalaciones\\_hoteleras](https://www.researchgate.net/publication/368155652_Estudio_para_la_actualizacion_del_coeficiente_de_demanda_para_instalaciones_hoteleras)
- Pérez Martínez, M., Ramos Guardarrama, J., Silvério Freire, R. C., & Barrios Gonzales, D. (2022). Desarrollo de aplicaciones en el software Scilab para el análisis de armónicos en sistemas industriales. *Ingeniería Energética*, 43(1), 1–10. <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/647/792>
- Pérez Martínez, M., Santos Fuentefría, A., & Llamo Laborí, H. S. (2021). *La importancia de la factura de electricidad. Un estudio de caso*. Cujae, ISBN: 978-959-261-605-9. [https://www.researchgate.net/publication/355090490\\_La\\_importancia\\_de\\_la\\_factura\\_de\\_electricidad\\_Un\\_estudio\\_de\\_caso](https://www.researchgate.net/publication/355090490_La_importancia_de_la_factura_de_electricidad_Un_estudio_de_caso)
- Reinoso, Jhon, & Salazar, Gabriel. (2017). Sistema de Medición Inteligente de Energía Eléctrica en la Empresa The Tesalia Springs Company S.A.: Implementación y Análisis de Resultados. *Revista Politécnica*, 39(2), 33-40. [http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1390-01292017000200033&lng=es&tlng=es](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-01292017000200033&lng=es&tlng=es)
- Rey, L. (Ed.). (27 de octubre de 2013). *Uso racional de energía: Acomodo de cargas*. Trabajadores. <https://www.trabajadores.cu/20131027/uso-racional-de-energia-acomodo-de-cargas/>

## BIOGRAPHIES



**Maykop, Pérez Martínez,** Graduated in Electrical Engineering from the Instituto Superior Politecnico Jose Antonio Echeverría CUJAE, in 2006. Later in 2010 he achieved the academic degree of Master in Electrical Engineering. He is currently an assistant professor and serves as head of the teaching

department of the Faculty of Electrical Engineering of the Jose Antonio Echeverría Technological University of Havana, CUJAE.



**Josnier, Ramos Guardarrama,** Born in 1982, Cuba. He received his electrical engineering degree from the José Antonio Echeverría Technological University of Havana (CUJAE), Havana, Cuba, in 2006. He completed his MSc. degree in 2010. He has taught the subjects of

simulation, analog and digital electronics, microcontrollers and power electronics. The areas of interest are embedded systems, electronics, power transformer testing and open software applications. He is currently pursuing his doctorate.



**José Antonio, Rodríguez Valdés** 4th year student of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering "José Antonio Echeverría" Technological University of Havana, CUJAE. Cuba. He participated in the II international scientific and technological convention of the

University of Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz.



**Cristian, Pérez Blanco,** 4th year student of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering "José Antonio Echeverría" Technological University of Havana, CUJAE. Cuba. Participated in the XI International Scientific Convention Sponsored by the

University of Matanzas in 2023.

ANNEXES.

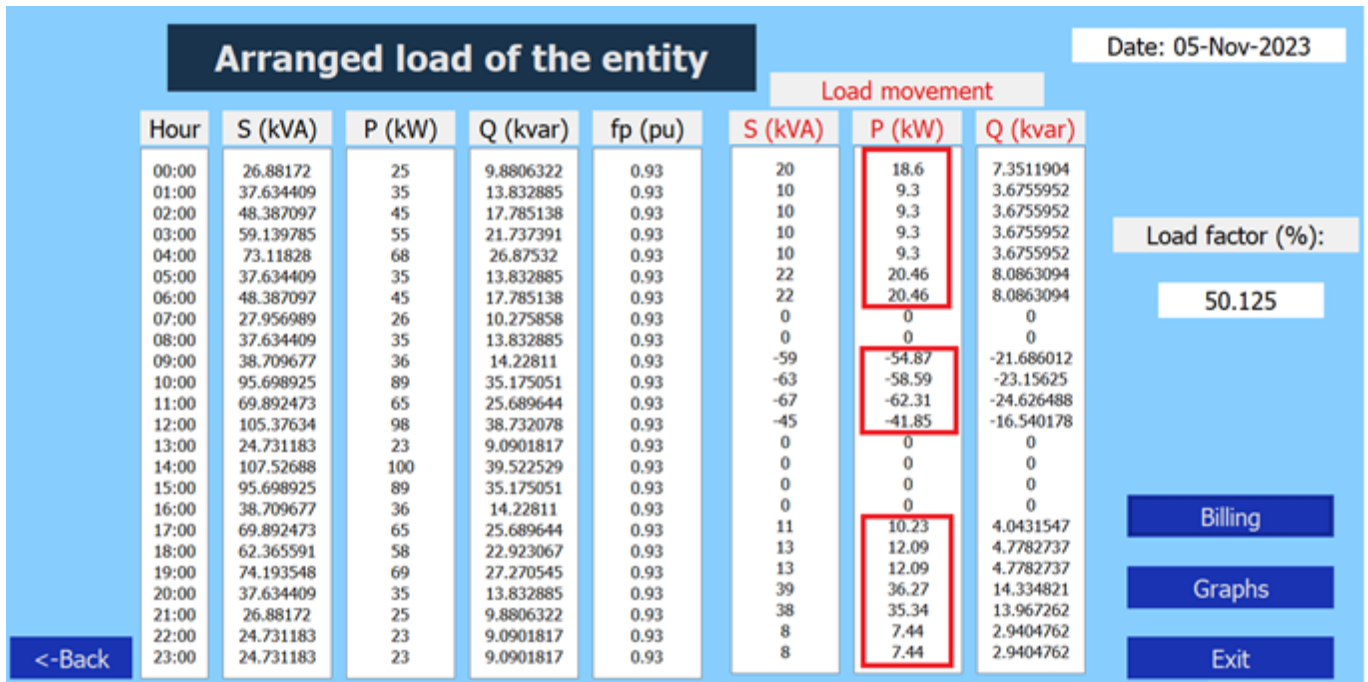


Figure 1. Result of the proposed load accommodation (Source: self - made)

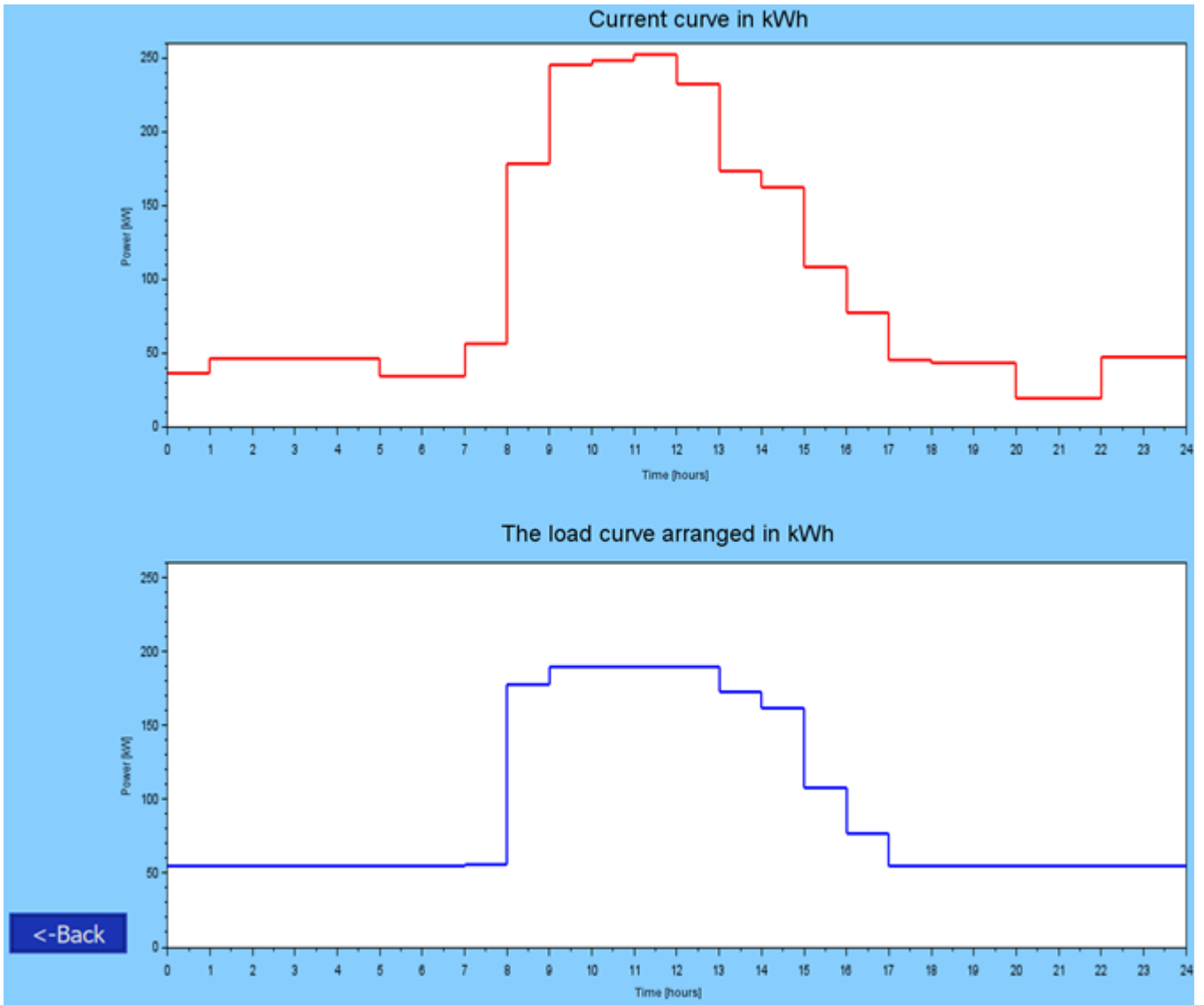
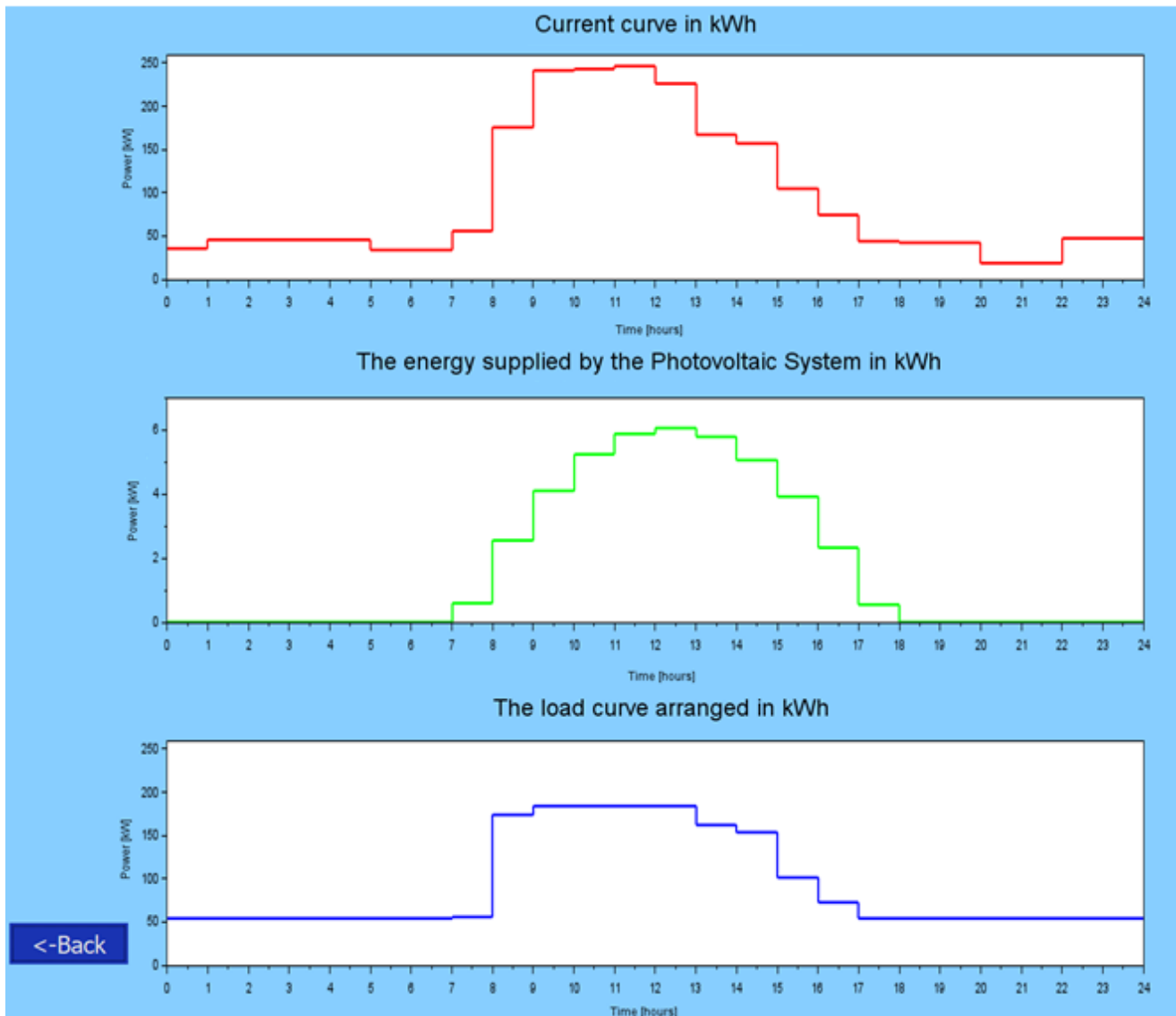
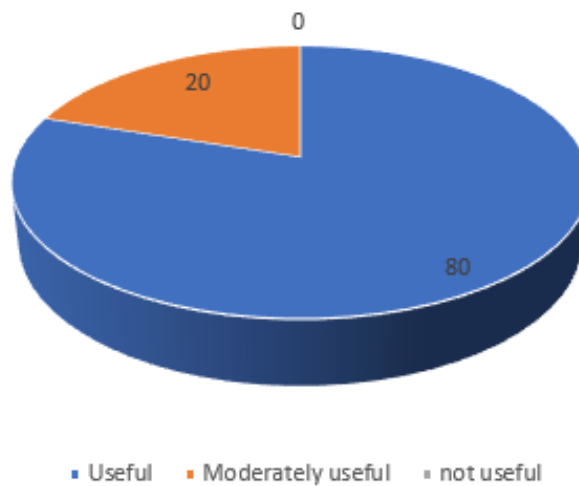


Figure 2. Chronological curve of daily load before and after load accommodation (Source: self - made)



**Figure 3.** Chronological curve of daily load of the industrial system under study with the inclusion of solar panels after carrying out the load arrangement (Source: self- made)



**Figure 4.** Result of the interview "utility of the application" (Source: self- made)





# Design and Simulation of a Log-Periodic Fractal Antenna for the Detection of Plastic Mines

Penagos Paz, Hernán<sup>1,\*</sup> ; Blanco Gómez, Cristian<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Master's program in Electronic engineering, Bogotá D.C, Colombia

**Abstract:** A fractal log periodic antenna for a Ground Penetrating Radar (GPR) is designed and simulated to evaluate the detection of plastic mines. The Brewster pseudo-angle concept is considered in the simulation to force the reflection component to a minimum value. The methodology focuses on the characterization and modeling of the transmission media and the plastic mine, in addition, the presence of the standing wave in the system is simulated to evaluate the return signal in the receiving antenna of the GPR. As a result, the multiband characteristic of the log-periodic fractal antenna and the signal-to-noise ratio (SNR) of 10,17 dB obtained for the resonance frequency of 1,35 GHz stand out. Likewise, the pseudo-Brewster angle of 70,47° minimizes the reflection of the incident electromagnetic wave in the transition between two dielectric media, with losses and dispersive in frequency (free space-ground).

**Keywords:** Log-periodic fractal antenna, plastic mine detection, ground penetrating radar, signal-to-noise ratio

## Diseño y Simulación de una Antena Fractal Log-Periódica para la Detección de Minas de Plástico

**Resumen:** Se diseña y simula una antena de registro periódico fractal para un radar de penetración terrestre (GPR) con el fin de evaluar la detección de minas plásticas. El concepto de pseudo-ángulo de Brewster se considera en la simulación para forzar el componente de reflexión a un valor mínimo. La metodología se enfoca en la caracterización y modelado de los medios de transmisión y la mina plástica, además, se simula la presencia de la onda estacionaria en el sistema para evaluar la señal de retorno en la antena receptora del GPR. Como resultado se destaca la característica multibanda de la antena fractal log-periódica y la relación señal a ruido (SNR) de 10,17 dB obtenida para la frecuencia de resonancia de 1,35 GHz. Asimismo, el pseudoángulo de Brewster de 70,47° minimiza la reflexión de la onda electromagnética incidente en la transición entre dos medios dieléctricos, con pérdidas y dispersivos en frecuencia (espacio libre-tierra).

**Palabras clave:** Antena fractal logarítmica periódica, detección de minas plásticas, radar de penetración terrestre, relación señal/ruido

### 1. INTRODUCTION

In Colombia, the Military Forces have identified that more than 90% of antipersonnel mines are made using handmade materials, plastic, and homemade explosives (Gutiérrez, 2014). Clearance techniques such as manual inspection of the terrain, mechanical (mine sweeping machines: tiller, flail, or others), and the deployment of mine detection canines (CDM) are ineffective for this type of mine. For this reason, it is necessary to continue researching new methods and technologies for the detection of this type of mines and explosive devices. This article reports the performance results of the fractal antenna as a transducer for a GPR, as an alternative for the detection of plastic mines. The physical

principle of GPR is extracting information from the plastic mine buried in the ground by comparing two signals: the one emitted and the one reflected by the buried object, with sufficient signal-to-noise ratios to be processed.

A fractal can be defined as a semi-geometric object characterized by a structure that repeats itself at different scales (Castro Fonseca, 2015). The science that studies these complex and irregular elements through geometric and mathematical algorithms is Fractal Geometry (Herrera Holguín & Inclán Luna, 2004). This geometry has had an impact on different areas of science including medicine, physics, engineering, and telecommunications (Montoya, 2012), as it is the case with the design and simulation of

\*heman.paz@escuelaing.edu.co  
Recibido: 30/03/2023  
Aceptado: 21/11/2023  
Publicado en línea: 09/02/2024  
10.33333/rp.vol53n2.02  
CC 4.0

antennas. Some fractal models used in antennas are Koch curves, Sierpinski triangles, and fractal trees, which take advantage of their natural multi-band capacity to minimize the antenna area (Montoya, 2012). In his research, Figueroa Torres (2016) proposes a fractal antenna based on the Sierpinski triangle to obtain a super-wide band antenna, which operates in the frequency range from 1,7 GHz to 26 GHz. Castro Fonseca (2015) presents the design of antennas based on the Koch curve, operating in the range of 470 MHz to 700 MHz, to be used in digital television service. In his thesis, Oltra (2009) designs and constructs a multiband fractal antenna based on the Hilbert curve to be used in cellular mobile telephony services.

Some antenna applications in antipersonnel mine detection systems in the international context use GPR systems operating in the microwave range. In the investigation carried out by Giannakis, Giannopoulos & Warren (2016), two tie-type antennas were used as transducers of a GPR system for 1,2 GHz and 1,5 GHz, respectively. In (Zainud-Deen, et al., 2009) the detection capacity of two parallel Microstrip antennas with corrugated earth as a propagation medium is studied. Lopera et al. (2007) propose filtering the reflections between the antenna and the ground in a radar system, as a strategy to improve the detection of antipersonnel mines.

In the national context, the project carried out by Mendoza & Serrano (2014) was identified, they developed an SDR (software-defined radio) platform and a prototype of a GPR system, with two VERT 900 dipole antennas, and two Vivaldi antipodal antennas (directive antennas), for the detection of antipersonnel mines. Baer et al. (2018) reported laboratory measurements for a GPR system consisting of a dual-polarized Vivaldi antenna, a maximum gain of 9 dBi, and a frequency range of 0,8 to 5 GHz.

The review of the state of the art made it possible to show a variety of antennas and Anti-Personnel Mines detection methods, this reflects the importance of this type of study for society. However, the use of fractal antennas for this purpose was not identified, for this reason, this investigation of the fractal antenna for the detection of plastic mines was carried out, which represents a contribution to the humanitarian demining processes from electronic engineering. This article is structured in four sections: the methodology, which describes the process used in the bibliographic search, proposal of the solution, relevant calculations and simulations carried out. In the results section, the results obtained from the simulations for the transmission and reception circuits proposed in the methodology are presented; in the discussion of the results section, the results obtained and their impact on the desired objective are analyzed. And finally, the conclusions of the work developed are presented, highlighting the relationship of the results with the proposed objectives.

## 2. METHODOLOGY

The methodology was structured in four phases: 1) review of the reference framework, 2) design and simulation of the log-periodic fractal antenna, 3) characterization and modeling of the transmission media, and the antipersonnel mine, and 4)

calculation of the energy balance of the electromagnetic wave radiated from the antenna in the direction of the ground and towards the mine buried at a depth of 10 cm, and reflected towards the receiving antenna, as shown in Figure 1.

The first phase revolved around identifying the theoretical background related to the properties of buried plastic mines, and the detection system using GPR (Giannakis et al., 2015). GPR was chosen because it is sensitive to non-metallic materials, such as plastic- (Giannakis, Giannopoulos & Warren, 2016), propagation of electromagnetic waves in two lossy media, Brewster's pseudo-angle of incidence, and antennas fractals, which allowed to identify the requirements for the design and simulation of the fractal antenna; among other requirements. The following are mentioned: broadband, preferably in the microwave band between 1 GHz and 3 GHz because it is the operating frequency range of the GPR, return loss less than -10 dB, a higher gain or equal to 6 dBi, input impedance of 50 Ohm and antenna tilt with the pseudo-Brewster angle to reduce power losses in the free space-ground transition (Sadiku, 1998).

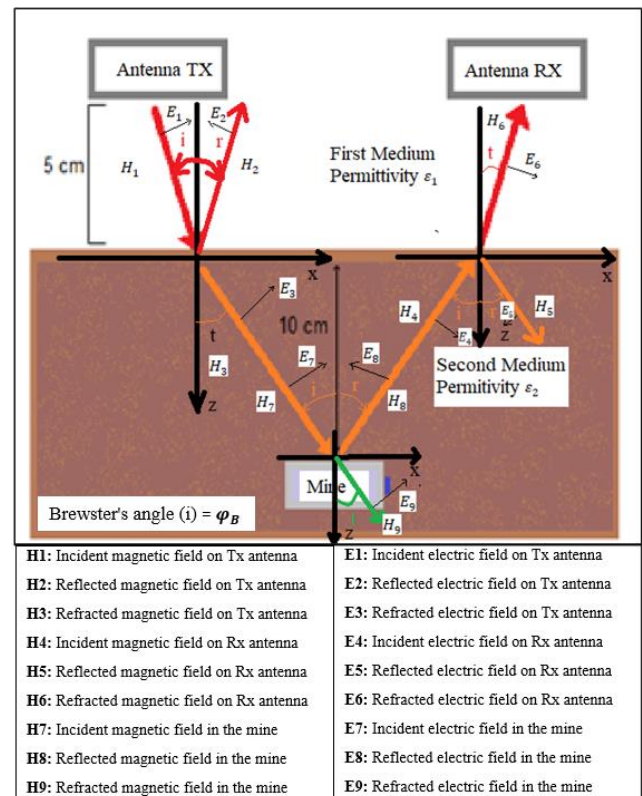


Figure 1. Electromagnetic wave propagation back and forth

Brewster's pseudo-angle or angle of least reflection is applied to minimize the power of the signal reflected by the transition between non-perfect, lossy, and frequency-dispersive dielectric media such as free space and the ground; allowing as much electromagnetic energy as possible to be transferred from the log-periodic fractal antenna to the ground. The main radiated lobe illuminates the ground with an inclination equal to that of the pseudo-Brewster angle so that the magnitude of the polarized EV wave is transmitted through the boundary and a reflection coefficient tending to zero is obtained (Ohman, 1977); this incidence angle is found with Equation 1.

$$\sin\varphi_B = \sqrt{\frac{1 + \frac{(\epsilon_{r1}\mu_{r1})}{(\epsilon_{r2}\mu_{r2})}}{1 + \left(\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}\right)^2}} \text{ (rad)} \quad (1)$$

$$n = \frac{\log(f_n) - \log(f_1)}{\log(\tau)} \quad (3)$$

Where  $\epsilon_{r1}$ , and  $\mu_{r1}$  are respectively the electrical permittivity and magnetic permeability for medium 1, and  $\epsilon_{r2}$ ,  $\mu_{r2}$  are the electrical permittivity and magnetic permeability for medium 2.

The next step was the development of phase 2: design and simulation of the fractal antenna. The chosen design was based on Amini, Oraizi & Zadeh (2015), with a slight variation: a log-periodic antenna made up of rhombic patches. This type of antenna has a reduced form factor, wide bandwidth, stable radiation pattern, and multi-resonance which are desirable for the particular case of detecting antipersonnel mines made of plastic containers. Under these characteristics, the input impedance is real at multiple resonance frequencies and couples better with the transmission line, achieving maximum energy transfer to the antenna, greater radiated power, and reflected signals with a better signal-to-noise ratio.

The antenna was designed in CST Microwave Studio 2018® with the following characteristics: average scale factor of  $\tau = 1,1065$ , six diamonds for six resonance frequencies, PTFE woven glass substrate dimensions of 28,0 cm x 20,4 cm, a thickness of 1,52 mm, and relative electrical permittivity of  $\epsilon_r = 2,50$ .

The scale factor  $\tau$  was obtained with Equation 2 and the number of iterations with Equation 3 (Sadiku, 1998).

$$\tau^n = \frac{f_n}{f_1} \quad (2)$$

Where  $\tau$  is the scale factor,  $f_n$  is the resonance frequency of the nth iteration,  $f_1$  is the initial frequency, and n is the number of iterations of the fractal antenna.

The resonance frequencies for each of the iterations are shown in Table 1.

**Table 1.** Log-periodic fractal antenna resonance frequencies

| Fractal No.     | 1    | 2    | 3    | 4    | 5   | 6    |
|-----------------|------|------|------|------|-----|------|
| Frequency (GHz) | 1,35 | 1,65 | 1,85 | 2,25 | 2,7 | 2,95 |

In phase 3, the physical phenomenon of the propagation of the electromagnetic wave -outward and return- was modeled through two lossy media: free space and ground; for which it was necessary to characterize these media for specific conditions of the lower Cauca sub-region of the department of Antioquia, Colombia (Díaz Diez, 2020). In this process, the procedures suggested by Sadiku (1998) and Hipp (1974) were taken as a reference. The explosive device was also characterized by the physical properties and the procedure reported in Pantoja et al., (2014), to model it as a load impedance.

The electrical properties of free space and soil, which define the speed of propagation of GPR waves and their amplitudes, as well as the dimensions of the bounded area of the soil sample, specified in Table 2, of the sub-region outlined above, allowed through the application of electromagnetic theory and simple calculations, obtain the primary parameters R, L, C, and G, per length unit, and secondary parameters  $\alpha, \beta, Z_0$  per length unit, from Table 3, for both transmission media.

**Table 2.** Physical and electrical properties of free space and soil sample for the lower Cauca subregion of the department of Antioquia

| Properties                       | Physical area  | Permeability $\mu_r$ (H/u.L.) | Relative permittivity $\epsilon_r$ (F/u.L.) | Conductivity $\sigma$ ( $\frac{S}{m}$ ) |
|----------------------------------|----------------|-------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Medium 1: free space             | 5cm x $\infty$ | 1                             | 1,0006                                      | $10^{-15} \approx 0$                    |
| Medium 2: soil (saturated clays) | 10cmx 10cm     | 1                             | 7,9476                                      | 3,4887                                  |

**Table 3.** Primary clearance, floor parameters and secondary parameters of free space and soil

| Primary Parameters   | R ( $\Omega$ /*) | L (H/ul)  | C (F/ul)  | G (S/ul) | $\alpha$ (Np/*) | $\beta$ (rad/ul) | $Z_0$ ( $\Omega$ ) |
|----------------------|------------------|-----------|-----------|----------|-----------------|------------------|--------------------|
| Medium 1: free space | 0                | 62,884 nH | 0,4421 pF | 0        | 0               | 2,25E-04         | 377**              |
| Medium 2: soil       | 165,9            | 67,527    | 13,089    | 90,89    | 1.89            | 17,545           | 69,368 + j 7,895** |

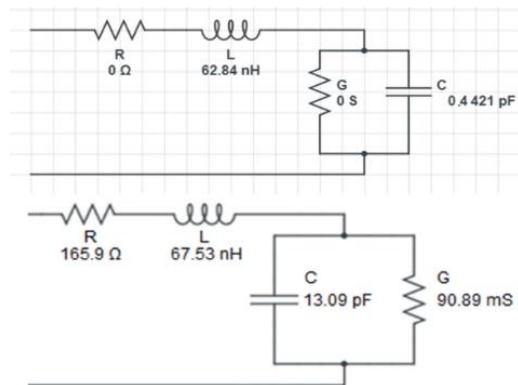
\* The unit length for the first Medium was 5 cm and for the second was 10 cm.

\*\* The unit per length for the first Medium was 5 cm and for the second Medium was 10 cm.

\*\*The characteristic impedance values are close to those found by the method proposed by (Pantoja et al., 2014).

Once the two transmission media were characterized, they were modeled using their respective equivalent circuits in distributed parameters, as shown in Figure 2.

To characterize and model the plastic mine, we started from the concept of the reflection coefficient in the charge  $\Gamma_L$  between two non-conductive and non-magnetic materials; this is defined as the ratio between the electric field intensity vector reflected in the load (plastic container mine) over the incident electric field intensity vector coming from the source (fractal antenna and passing through two transmission media).



**Figure 2.** Equivalent circuit for free space (top) and Equivalent circuit for ground (bottom)

The value of this parameter was obtained with Equation 4, taking as a reference the relative permittivity of the soil  $\epsilon_1$ , which was  $\epsilon_1 = 7,9$ , and the relative permittivity of the plastic container mine  $\epsilon_2$  with Polyethylene Terephthalate material (also known by its acronym PET), which was of  $\epsilon_2=3,65$  respectively.

$$\Gamma_L = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (4)$$

The substitution of the value of the reflection coefficient of 0,192, in Equation 5, allowed us to find the value of the load impedance  $Z_L$  that models the plastic mine. In this equation, the value of  $Z_0$  corresponds to the characteristic impedance of the transmission line, where a value of 50 Ohms is used, a

value that is considered optimal for reducing attenuation (Sadiku, 1998).

$$Z_L = Z_0 \left( \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L} \right) = 102,35 + j11,65 (\Omega) \quad (5)$$

For the development of phase 4, the equivalent circuits were interconnected in distributed parameters, which model the free space and ground transmission media, with the circuit model of the mine represented in a  $Z_L$ ; the signal source that feeds the circuit is 30 V (this level corresponds to 20,6 W rms for a radiation impedance of 43,74-j3,51  $\Omega$  at a frequency of 1,35 GHz), which is equivalent to the radiated power by the log-periodic fractal antenna with a pseudo-Brewster angle of incidence of 70,47°. Figure 3 shows the equivalent circuit for the forward simulation.

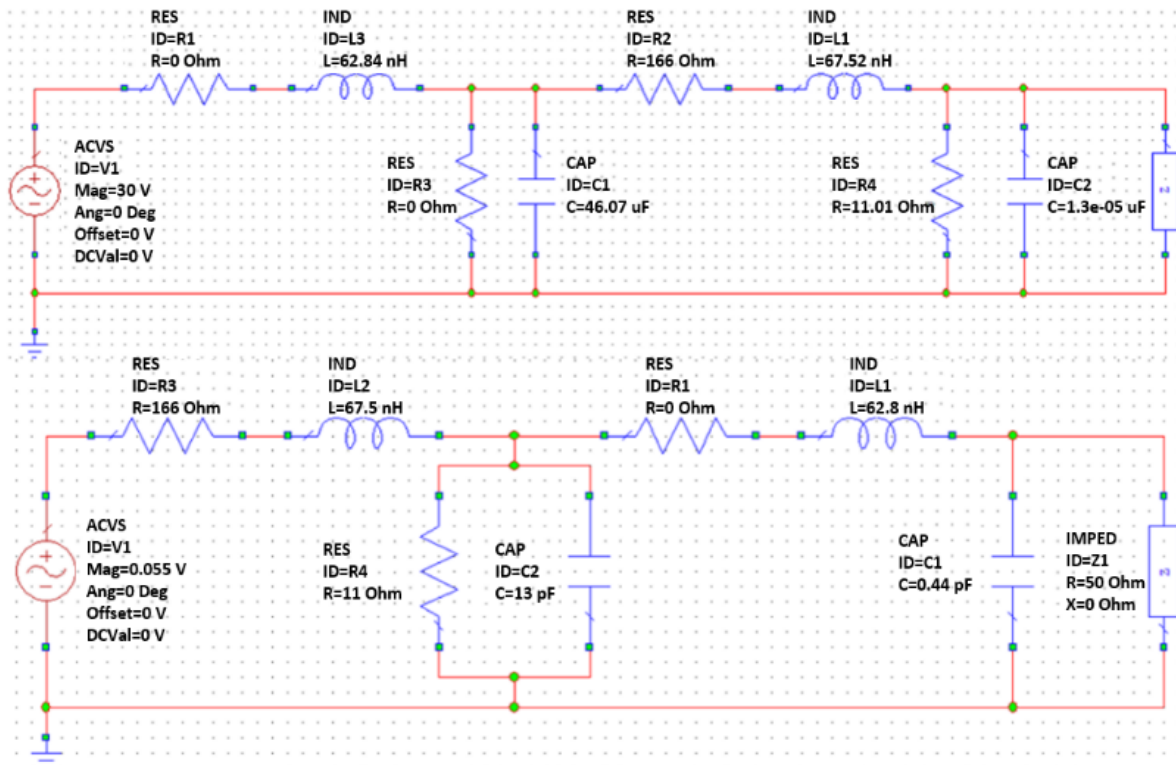


Figure 3. Equivalent circuit of the system for the forward signal (top) and system equivalent circuit for the return signal (bottom)

Figure 3 shows the equivalent circuit for the return signal (A-Scan). In this case, the source represents the signal reflected by the plastic lead, the two equivalent circuits connected in cascade represent the two-transmission media: the ground and free space respectively, and the load impedance of 50  $\Omega$  represents the input impedance of the spectrum analyzer antenna, which acts as a signal receiver. This is located next to the fractal antenna, but electromagnetically isolated.

The simulation of the propagation of the signal from the fractal antenna (source) to the buried plastic mine (charge), and its reflection towards the receiving antenna, was done in the Cadence AWR® software for six resonance frequencies of the log-periodic fractal antenna.

### 3. RESULTS

The simulation of the fractal antenna with the CST Microwave Studio 2018® software, for the six resonance frequencies, was done to identify the dispersion parameter  $S_{11}$ , VSWR, and verify uniformity in the radiation pattern of the main lobe. Figure 4 shows that the best values of the dispersion parameter  $S_{11}$  of -9,08 dB and -32,29 dB correspond to the frequencies of 1,35 GHz and 2,95 GHz, respectively.

Figure 4 shows that for the frequencies of 1,35 GHz and 2,95 GHz the lowest values of VSWR are presented, which is desirable.

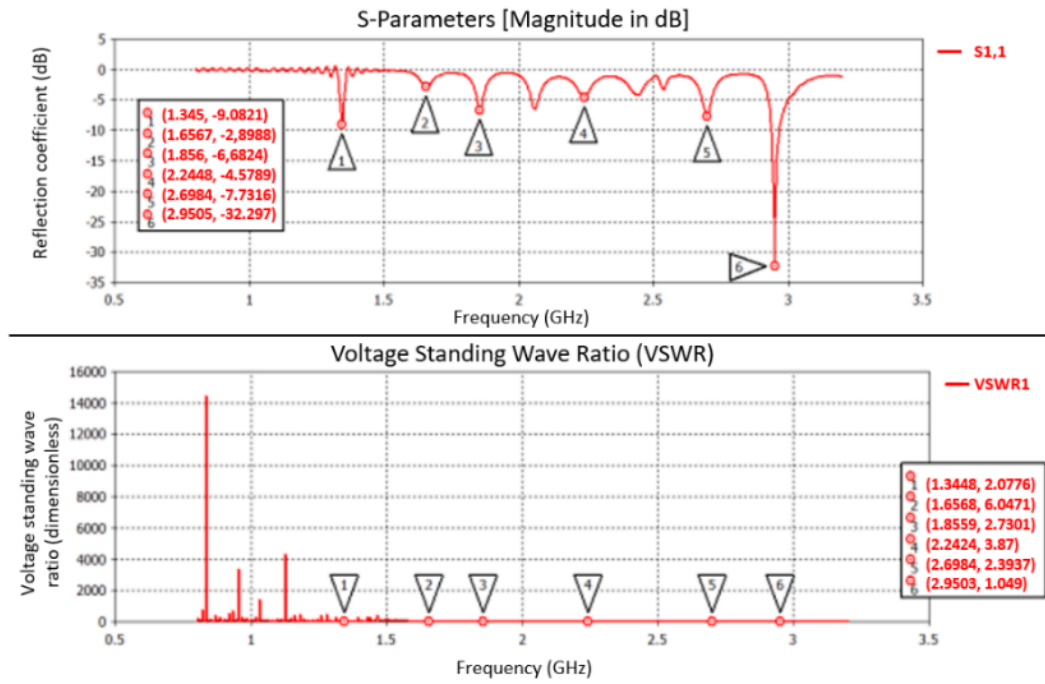


Figure 4. Log-periodic fractal antenna parameter  $S_{11}$  (top) and VSWR of log-periodic fractal antenna signal

Likewise, it was observed, for the frequencies of 1,35 GHz and 2,95 GHz, greater directive gain, uniformity in the radiation pattern of the main lobe (Figure 5), and beam widths, which allow inferring a bandwidth that goes from 1,19 GHz to 1,36 GHz, for the 1,35 GHz resonant frequency, and from 2,8 GHz to 2,95 GHz for the 2,95 GHz resonant frequency.

for six resonance frequencies of the log-periodic fractal antenna, for the circuits presented in Figure 3, are shown in Table 4. They are expressed in terms of power in the plastic load and power at the input of the receiving antenna for the return signal.

Table 4. Results obtained in the simulation

| Frequency (GHz) | Maximum power value in the mine ( $\mu\text{W}$ ) | Maximum value of power that returns to the receiving antenna (pW) |
|-----------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1,35            | 29,76                                             | 224,5                                                             |
| 1,65            | 2,46                                              | 11,93                                                             |
| 1,85            | 1,42                                              | 0,66                                                              |
| 2,25            | 0,12                                              | 0,019                                                             |
| 2,70            | 0,035                                             | 1,88E-03                                                          |
| 2,95            | 0,027                                             | 7,87E-04                                                          |

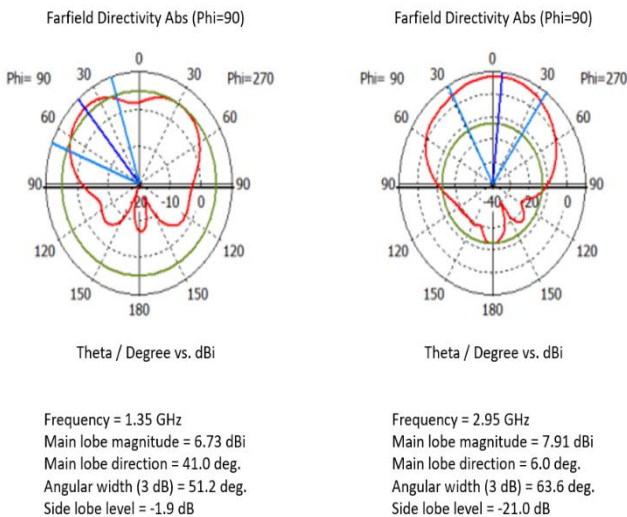
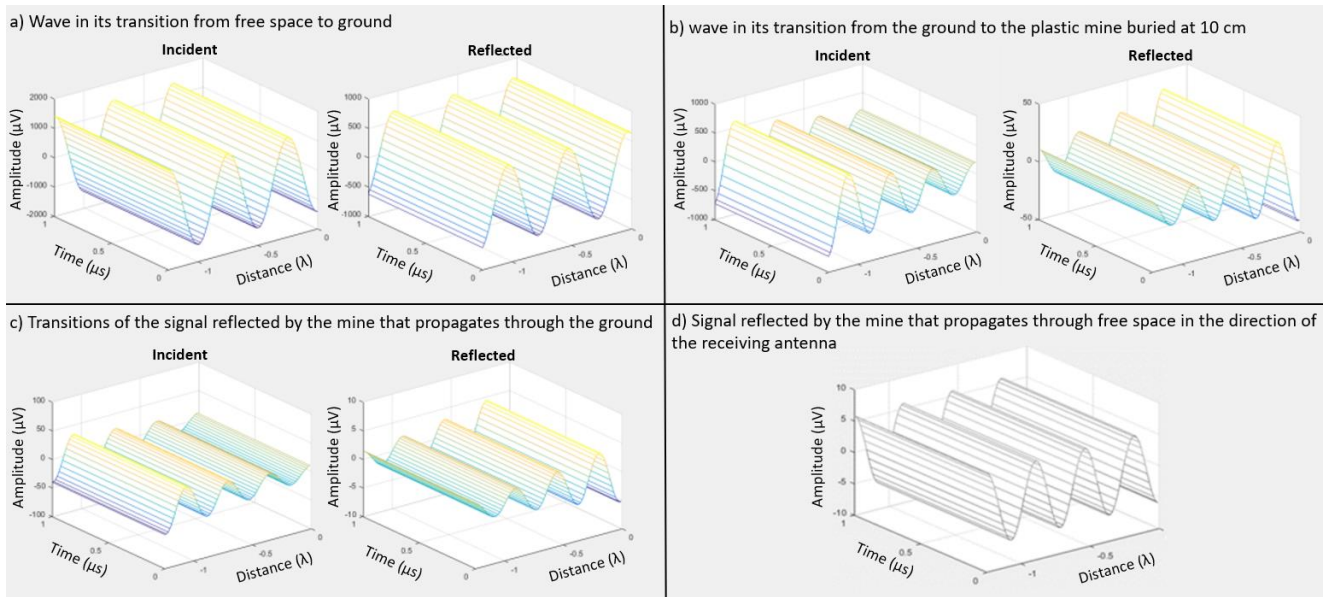


Figure 5. Largest directives gain and beam width for two of the six resonance frequencies of the log-periodic fractal antenna

From the results of the simulation of the log-periodic fractal antenna, it can be inferred that 1,35 GHz and 2,95 GHz are the resonance frequencies with the best performance in the simulation of the parameters indicated above. Taking the simulation results as a reference, the log-periodic fractal antenna was built with direct coupling feeding with SMA, shown in the annexes. The results obtained in the simulations

The resonance frequency of 1,35 GHz shows 224,5 pW, which is the highest power transferred in the free space-ground, ground-mine transitions (for the forward signal) and reflected by the mine towards the receiving antenna.

Figures 6a and 6b show the Matlab simulation of the standing wave (incident and reflected) at a resonance frequency of 1,35 GHz, which is transmitted from the fractal antenna (with the pseudo-Brewster angle of  $70,47^\circ$ ) and propagates through free space in the direction of the buried plastic mine at 10 cm (forward). This signal passes through the free space-ground transition (Figure 6a), propagates through the ground, and is reflected in the mine (Figure 6b).



**Figure 6.** (a) Incident and reflected wave in its transition from free space to ground, (b) incident and reflected wave in its transition from the ground to the plastic mine buried at 10 cm, (c) transitions of the signal reflected by the mine that propagates through the ground and (d) signal reflected by the mine that propagates through free space in the direction of the receiving antenna

The electric and magnetic fields of the incident reflected, and transmitted waves are perpendicular to their propagation directions, due to an inherent property of plane waves; no attenuation is evident in the incident and reflected waves in free space and their magnitudes change due to the reflection coefficient in the transition of the two media. Figure 6b shows the wave transmitted from free space to the ground, which is proportional to the transmission coefficient of Equation 6 (Sadiku, 1998).

$$T_{EL-S} = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2\varepsilon_2 \cos(i)}{\varepsilon_1 \cos(i) + \varepsilon_2 \cos(t)} \quad (6)$$

Where  $\varepsilon_1$  is the relative permittivity of free space,  $\varepsilon_2$  is the relative permittivity of the ground; (i) is the angle of incidence of the simulated GPR wave, which is equivalent to Brewster's pseudo-angle of incidence of  $70,47^\circ$ , (t) is the transmission angle,  $E_t$  is the refracted electric field,  $E_i$  is the incident electric field, and  $T_{EL-S}$  is the transmission coefficient. Figure 6b shows considerable attenuations of  $1,89 \text{ Np}/10 \text{ cm}$  in the propagation through the ground and reflected power of  $\mu\text{W}$  in the plastic mine.

Figures 6c and 6d show the Matlab simulation of the electromagnetic wave reflected from the discontinuity (plastic mine buried at 10 cm) to the receiving antenna; this signal propagates through the ground (incident wave of Figure 6c), undergoes a transition in the change of medium to free space (incident wave of Figure 6d) and propagates without attenuation through this medium until it reaches the receiving antenna.

The value of the power of the signal received at the receiving antenna must be greater, at least 10 times, than the value of the thermal power of the GPR so that it can detect the discontinuity or buried object. The thermal power of the GPR is calculated with Equation 7.

$$P_{term} = 1,6 \times 10^{-20} \Delta f \quad (7)$$

Where  $\Delta f$  is the resonance frequency of the transmitting antenna.

If the power received in the GPR antenna of  $224,5 \text{ pW}$  is related to its theoretical thermal power of  $21,6 \text{ pW}$ , for the resonant frequency of  $1,35 \text{ GHz}$ , the signal-to-noise ratio (hereinafter SNR) is obtained 10,4 times (10,17 dB).

#### 4. DISCUSSION OF THE RESULTS

Current GPR systems have the drawback of a high rate of false alarms due to the low SNR present in the operation of the System. For this reason, it is desirable that: 1) the power radiated by the log-periodic fractal antenna be greater than  $20,6 \text{ W rms}$  so that the returning electromagnetic wave guarantees an SNR greater than 10,17 dB; 2) the Medium of propagation: free space and ground, are homogeneous and sufficiently resistive to avoid total attenuation of the signal before completing its path; 3) the size of the log-periodic fractal antenna is comparable to the wavelength of the emitted signal; 4) the electromagnetic properties of the transmission media: free space and ground are homogeneous along their respective lengths, and in their outward and return transitions favor the transmission of the electromagnetic wave; 5) the electromagnetic properties of the soil and the buried plastic mine are testable so that a reflection coefficient tending to one is produced so that the GPR is capable of detecting the buried plastic mine.

A promising alternative to address the problem of false alarms in the GPR -under real conditions of floors, laminates, non-homogeneous and variants in the frequency domain, due to the presence of water and other materials that change their electrical characteristics-, is the exploitation of the physical principle of maximum power transfer to the ground, when it is radiated at a certain angle, known as pseudo-Brewster, which would allow the increase of the SNR in the GPR.

This investigation confirmed the dependence of the pseudo-Brewster angle and the soil dielectric constant. The calculated value for the pseudo-Brewster angle is 70.47 degrees. This angle represents the angle of least reflection in which the field component parallel to the plane of incidence is minimized, resulting in less dispersion due to overlapping with the returning electromagnetic wave. Achieving an SNR in the GPR greater than 10 times is guaranteed. Unfortunately for this type of applications and as corroborated by Merve & Gupta (2000), the dielectric constant of the soil varies throughout the area of the buried plastic mine, preventing the determination of a unique pseudo-Brewster angle for this type of application.

The results obtained for both simulations show very small amplitude values compared to the signal originally transmitted by the log-periodic fractal antenna; this is mainly due to the heterogeneity of the physical-chemical and biological properties of the soil, and its attenuation of 1.89 Np/10 cm, which affects both the wave that impacts the buried plastic mine and the wave that is reflected from it.

#### 4. CONCLUSIONS

The receiver SNR of 10,4 times meets the criteria of being at least 10 times higher; consequently, the log-periodic fractal antenna can be used by the GPR at the resonance frequency of 1,35 GHz, for the detection of the plastic mine.

The biggest challenge in achieving the detection of a plastic mine lies in the inhomogeneous electrical properties of the ground as it generates different reflection and refraction indices of the signal when passing from free space to the ground. In addition, the wave propagation constant shows non-linear behavior with frequency when propagating through the ground. This conclusion is based on the electrical properties of the soil reported in Table 2 and coincides with the experimental findings reported by Díaz Diez (2020).

The self-similarity principle of the log-periodic fractal antenna facilitates the multiband characteristic that gives the possibility of selecting the resonance frequency in which the best results are obtained. This characteristic of the fractal antenna increases the chances of achieving a stop with better resolutions for the GPR.

Adjusting the angle of incidence of the main lobe of the transmitting antenna to the pseudo-Brewster angle of 70.47° at the transition between two dielectric media, with losses and frequency dispersive, such as air and soil, allows the transfer of the greater amount of electromagnetic energy to the second medium, this is evident in Figure 6a to 6d.

#### REFERENCES

- Amini, A., Oraizi, H., & Zadeh, M. A. C. (2015). Miniaturized UWB Log-Periodic Square Fractal Antenna. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 14(1), 1322-1325. <http://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2411712>
- Baer, C., Schulz, C., Just, T., Gutierrez, S., Orend, K., Barowski, J., Martinez, D., Hattenhorst, B., Jebramcik, J., Pantoja, J., Musch, T., Rolfes, I., Sachs, J., & Vega, F. (2018, September 10-14). *Humanitarian Microwave Detection of Improvised Explosive Devices in Colombia* [Conference presentation abstract]. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Cartagena, Colombia. <http://doi.org/10.1109/ICEAA.2018.8520508>
- Castro Fonseca, A. (2015). *Diseño de antenas fractales para Televisión Digital en Cuba* [Graduate dissertation, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas]. UCLV Campus Repository. <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/4455>
- Díaz Diez, C. (2020). Características de los suelos del bajo Cauca y los principales procesos erosivos que sobre ellos se han dado. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – CORPOICA 1*(1), 1-7. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/35624>
- Figuroa Torres, C. Á. (2016). *Investigación y análisis electromagnético de estructuras de antenas fractales de banda ancha* [Doctoral dissertation, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada - CICESE]. CICESE Repository. <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/1342>
- Giannakis, I., Giannopoulos, A., & Warren, C. (2016). A Realistic FDTD Numerical Modeling Framework of Ground Penetrating Radar for Landmine Detection. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(1), 37-51. <http://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2468597>
- Giannakis, I., Giannopoulos, A., Warren, C., & Davidson, N. (2015, July 07-10). *Numerical modelling and neural networks for landmine detection using ground penetrating radar* [Conference presentation abstract]. 2015 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), Florence, Italy. <http://doi.org/10.1109/IWAGPR.2015.7292682>
- Gutiérrez Rueda, D.C. (2014). *La desegregación de las minas antipersonales, una guerra bajo tierra* [Graduate dissertation, Universidad Militar Nueva Granada]. Universidad Militar Nueva Granada Repository. <http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/12174>
- Herrera Holguín, M. P., & Inclán Luna, J. C. (2004). *Estudio y metodología de diseño de antenas utilizando Geometría Fractal (Antenas fractales)* [Undergraduate dissertation, Escuela Politécnica Nacional]. EPN Digital Repository. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11124>
- Hipp, J. E. (1974). Soil electromagnetic parameters as functions of frequency, soil density, and soil moisture. *Proceedings of the IEEE*, 62(1), 98–103. <http://doi.org/10.1109/proc.1974.9389>
- Lopera, O., Slob, E. C., Milisavljevic, N., & Lambot, S. (2007). Filtering Soil Surface and Antenna Effects from GPR Data to Enhance Landmine Detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(3), 707-717. <http://doi.org/10.1109/TGRS.2006.888136>
- Mendoza Patiño, E. D. J., & Serrano Bernal, L. E. (2014). *Programación de una plataforma sdr (software defined*

radio) para la detección de minas antipersonas [Undergraduate dissertation, Pontificia Universidad Javeriana]. Pontificia Universidad Javeriana Institutional Repository.  
<http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/16514>

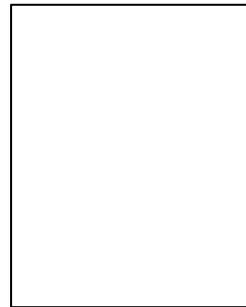
- Merve, A. & Gupta, I. J. (2000). A novel signal processing technique for clutter reduction in GPR measurements of small, shallow land mines. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 38(6), 2627-2637. DOI: 10.1109/36.885209
- Montoya Lince, A. (2012). *Antenas fractales: un paso en la evolución de las telecomunicaciones* [White paper]. Universidad de Antioquia.  
[http://www.radiocomunicaciones.net/pdf/antenas\\_fractales.pdf](http://www.radiocomunicaciones.net/pdf/antenas_fractales.pdf)
- Ohman, G. (1977). The pseudo-Brewster angle. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 25(6), 903-904. <http://doi.org/10.1109/TAP.1977.1141718>
- Oltra González, A. (2009). *Diseño y construcción de una antena fractal multibanda para telefonía móvil celular* [Graduate dissertation, Universidad Politécnica de Cataluña]. UPCommons.  
<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/8066>
- Pantoja, J., Peña, N., Rachidi, F., Vega, F., & Román, F. (2014). Characterization, Modeling, and Statistical Analysis of the Electromagnetic Response of Inert Improvised Explosive Devices. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 56(2), 393-403. <http://doi.org/10.1109/TEMC.2013.2284964>
- Sadiku, M. (1998). *Elementos de electromagnetismo* (3rd ed.). Editorial CECSA.
- Zainud-Deen, S. H., Badr, M. E. S., Hassan, E., Awadalla, K. H., & Sharshar, H. A. (2009). Effects of Soil Physical Properties on Landmines Detection Using Microstrip Antenna as a Sensor. *Progress in Electromagnetics Research*, 7(1), 13-24. <http://doi.org/10.2528/PIERC09012403>

## BIOGRAPHIES



**Hernán, Paz Penagos, PhD.,** Received his Ph.D. degree from the National Pedagogical University of Colombia in 2012. He graduated in electronic engineering from the District University Francisco José de Caldas and received his master from the same university. He currently works at Escuela Colombiana de Ingeniería

**JULIO GARAVITO.** During the past 20 years, his research has been centered on various topics of digital communications, antennas, including analysis, design, development, measurement, and propagation and radiation aspects of terrestrial and space-based communication, wireless, mobile, satellite, and telecommunications. As a professor and researcher, he has directed several research projects and published more than 30 scientific papers and five research books on communications systems. In addition, he has researched in teaching methods and pedagogic theory., **ID Scopus:** 55344136500 and **Google Scholar:** <https://scholar.google.com/citations?user=8YmHJ6EAAA&hl=en>.

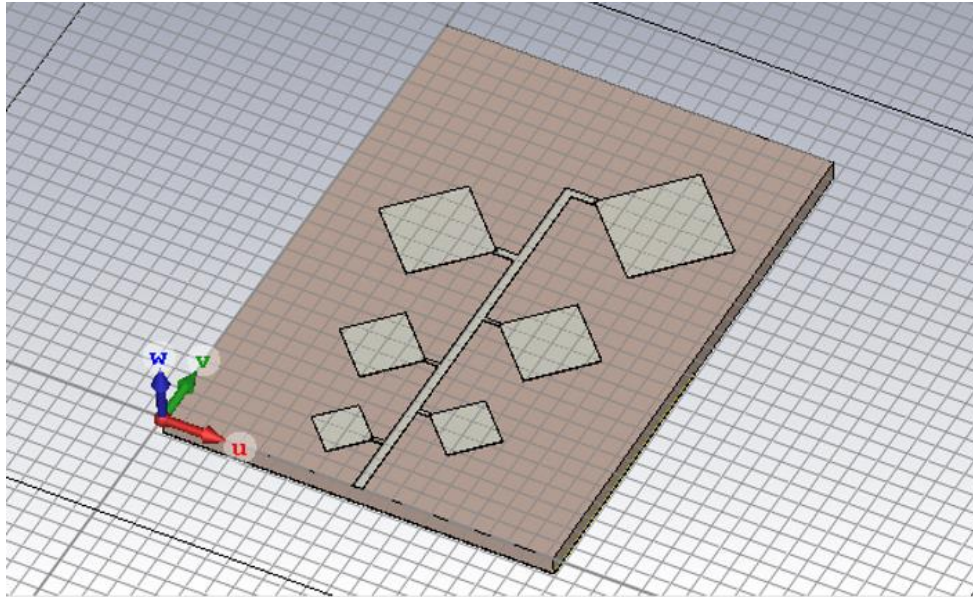


**Cristian, Blanco Gómez,** Electronic Engineer of the University of Santander - UDES, 2009 - 2014; Master in Electronic Engineering, Emphasis on Telecommunications, from the Colombian School of Engineering 'Julio Garavito', 2017 - 2021. Work Experience: Mobile Networks Engineer, Huawei Technologies Colombia.



### ANNEXES




Based on the results obtained from the simulation carried out, the log-periodic fractal antenna with direct coupling feed with SMA was built, as observed in annex 1.



Annex 1. Log-periodic fractal antenna



# Herramienta Computacional para Determinar los Residuos de Sistemas Eléctricos de Potencia

Oscullo, José <sup>1,\*</sup>  ; Jumbo, Roberto <sup>1</sup>  ; Otero, Patricia <sup>1,\*</sup>  ;

<sup>1</sup>Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Energía Eléctrica, Quito, Ecuador

**Resumen:** Este artículo presenta el desarrollo de una herramienta de cálculo de los residuos de los modos críticos de oscilación para un sistema eléctrico, utilizando datos del análisis modal de PowerFactory de DIgSILENT. El problema planteado es de gran importancia en los sistemas eléctricos actuales, los cuales se caracterizan por operar sus elementos al límite y si estas oscilaciones, no son adecuadamente amortiguadas, pueden causar fallas en la generación al reducir el nivel de estabilidad del sistema. PowerFactory es una herramienta de ingeniería para analizar sistemas eléctricos, utilizado ampliamente en la industria e investigación. Este software cuenta con un lenguaje propio de programación, a saber, DIgSILENT Programming Language (DPL), el cual permite procesar variables de interés desde el análisis modal, mismas que pueden ser usadas en otros dispositivos del sistema, como son los estabilizadores de sistemas de potencia (PSS). Mediante programación de las variables de interés, se calcula el residuo de los modos críticos de oscilación. Así, el cálculo del residuo requiere del procesamiento de la matriz de estados  $A$  facilitada directamente por PowerFactory y de la construcción de las matrices de las variables de entrada  $B$  y salida  $C$ , respectivamente, por medio de programación DPL para diferentes escenarios operativos del sistema eléctrico de potencia. La metodología de cálculo se ha aplicado a sistemas eléctricos disponibles en la literatura especializada en estabilidad oscilatoria en la cual se aplica la herramienta para observar la dinámica de los modos de oscilación con y sin PSS, siendo estos últimos sintonizados mediante el residuo calculado.

**Palabras claves:** Estabilidad de pequeña señal, Sistemas eléctricos de potencia, Residuos, Análisis modal

## Computational Tool to Determine the Residues of Electrical Power Systems

**Abstract:** This paper presents the development of a tool to calculate the residue of the critical oscillation modes for an electrical system obtained through the DIgSILENTs PowerFactory modal analysis tool. This problem is essential in current electrical systems that are characterized by operating their elements at the limit, and if these oscillations are not adequately damped, they can cause generator failures by reducing their level of stability, making the system vulnerable. PowerFactory is an engineering tool to analyze electrical systems, widely used in industry and research. This software has its own programming language, DIgSILENT Programming Language (DPL), providing the capability to process variables of interest from the modal analysis, which can be used in other system devices, such as power system stabilizers (PSS). The residue of the critical oscillation modes can be calculated by programming the variables of interest. Consequently, the calculation of residue requires the processing of the state matrix  $A$  provided directly by PowerFactory, whereas it is possible to construct the matrices of the input variables  $B$  and output variables  $C$ , respectively, by means of DPL programming for different operating scenarios of the electrical power system. The calculation methodology has been applied to electrical systems from the literature specialized in oscillatory stability. The tool is applied to observe the dynamics of the oscillation modes both with and without PSS, the latter being tuned by the calculated residues.

**Keywords:** Small signal stability, Electric power system, Residue, Modal analysis

### 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el control de una red eléctrica presenta complejidad debido a la cantidad de dispositivos y equipos a ser monitoreados durante su operación. Esta situación de los sistemas eléctricos de potencia (SEP) actuales, requiere del análisis de grandes conjuntos de datos, por medio de los cuales es posible determinar su

nivel de estabilidad de pequeña señal, misma que se caracteriza por presentar modos de oscilación de frecuencias desde 0,1 a 3 Hz. Por lo indicado, dado el volumen de datos es necesario contar con un algoritmo eficiente capaz de trabajar matricialmente para administrar las señales de entrada y salida de los equipos del sistema y dispositivos de control. Estas señales, una vez procesa-

\* jose.oscullo@epn.edu.ec

Recibido: 05/07/2023

Aceptado: 21/11/2023

Publicado en línea: 09/02/2024

10.33333/tp.vol53n1.03

CC BY 4.0

das adecuadamente, permitirán determinar el nivel de estabilidad presente en el SEP (Chow y Sanchez, 2020).

En la barra de interés del SEP, es posible obtener las señales de potencia y voltaje, además, si esta barra corresponde a una barra de generación es posible sensar su velocidad. Mediante el análisis modal es posible identificar los modos de oscilación pobre o negativamente amortiguados (Mondal et al., 2020). Con esta información ese puede determinar el nivel de amortiguamiento y oscilatorio del sistema, el cual que podría depender de una parametrización incorrecta de los dispositivos de control, entre otras causas (Oscullo y Gallardo, 2020a). Dada la dinámica operativa del sistema en búsqueda de mantener el balance entre la generación y la demanda, es necesario que los elementos de control de oscilaciones, como es el caso de los estabilizadores del sistema de potencia (PSS) deben responder a esta dinámica (Oscullo y Gallardo, 2020b). Así, resulta interesante determinar ante distintos escenarios determinísticos los parámetros de sintonización de los PSS mediante el uso de los residuos de los modos de oscilación críticos como se plantea en este trabajo.

Mondal et al. (2020), Oscullo y Gallardo (2020b) indican que, en la operación y simulación de un sistema eléctrico, el nivel de estabilidad de pequeña señal se determina mediante los modos de oscilación presentes en un escenario operativo del sistema obtenidos principalmente por medio del análisis modal. Generalmente, las oscilaciones se presentan entre los elementos que producen y consumen energía en el sistema. Por lo tanto, surge la necesidad de modelar los elementos de generación y demanda a fin de representar estas dinámicas, a través de un conjunto de ecuaciones algebraicas diferenciales que se resuelven utilizando software de ingeniería. Para el caso del estudio se utiliza PowerFactory, el cual permite obtener el nivel de estabilidad de pequeña señal mediante el módulo de análisis modal.

Mediante el análisis modal de cada condición operativa del sistema, PowerFactory presenta el factor de participación, la frecuencia, el nivel de amortiguamiento y al igual que otros softwares de ingeniería no calcula los residuos (DIgSILENT, 2022).

Para la determinación de los residuos se requiere del procesamiento de la matriz  $A$  que contiene el estado del sistema, la matriz  $C$  que indica el nivel de observabilidad de las salidas, la matriz  $B$  que muestra la controlabilidad de las entradas y los vectores izquierdo y derecho de los modos de oscilación (Kundur, 1974). En el software de ingeniería PowerFactory al ejecutar el comando *ComMod\** para el análisis modal no se obtienen los residuos (DIgSILENT, 2022; Pizarro et al., 2014). Con esta información, la cual puede ser seleccionada por el usuario en el software, se obtiene el módulo y ángulo del residuo para cada modo de oscilación analizado y con el residuo es posible trasladar el modo de oscilación crítico seleccionado hacia la zona estable mediante la parametrización del estabilizador de sistema de potencia.

Basado en lo anterior, en este artículo se presenta la programación necesaria que permita la obtención de los residuos de un sistema eléctrico mediante la programación DPL en PowerFactory, por medio del proceso matricial entre las variables obtenidas del análisis modal en combinación con la construcción de las matrices  $B$  y  $C$ . Estas matrices determinan el nivel de sensibilidad de las variables de entrada y salida y con esta información es posible calcular

los residuos de los modos seleccionados. Con el procesamiento de estos últimos se puede desplazar los modos de oscilación críticos al modificar la sintonización del PSS con el fin de incrementar el nivel de estabilidad del sistema de potencia.

Este documento se estructura de la siguiente manera: la sección 2 presenta el análisis modal para el cálculo del residuo, la sección 3 describe algunos aspectos clave para la implementación del script DPL. La sección 4 expone la aplicación de los residuos en la sintonización del PSS para incrementar el nivel de amortiguamiento de las oscilaciones y la sección 5 presenta las conclusiones.

## 2. ANÁLISIS MODAL Y RESIDUOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

### 2.1 Análisis Modal de Sistemas Eléctricos de Potencia

El concepto de estabilidad de pequeña señal corresponde a una subclase de estabilidad de ángulo del rotor debido a la presencia de pequeñas perturbaciones. Situación que obliga al operador del SEP a realizar ajustes en el despacho de la generación para abastecer la demanda.

La necesidad de monitorear la estabilidad del SEP mediante simulaciones requiere del modelo no lineal del sistema en el dominio del tiempo, caracterizada por ecuaciones dinámicas. Sin embargo, la simulación en el dominio del tiempo no suministra mucha información sobre la estabilidad, sino únicamente el status de *estable* o *inestable*.

Dada la característica de la estabilidad de pequeña señal, las ecuaciones que representan la dinámica del sistema, pueden ser linealizadas alrededor del punto de equilibrio, y con ello obtener información adicional de la estabilidad del SEP como es: nivel de estabilidad y frecuencia de los modos de oscilación. Dicha información tratada adecuadamente permite parametrizar los dispositivos de control y monitoreo de la estabilidad del sistema y de ser el caso establecer alarmas o desplazar los modos críticos de oscilación de esta manera incrementar el nivel de amortiguamiento del sistema.

A partir de la teoría de control, se determina que la dinámica de un sistema no lineal depende del nivel de transferencia y capacidad de procesamiento de la energía entre las distintas partes del sistema tanto en la operación como en la perturbación. Dado que los sistemas de potencia son sistemas no lineales de gran escala, se caracterizan por estar sujetos a la presencia de oscilaciones de baja frecuencia (Chow y Sanchez, 2020).

Este fenómeno oscilatorio es recurrente en la operación del sistema que se distingue por ser cuasi-estacionaria, debido a las pequeñas variaciones presentes en las condiciones de operación para abastecer la carga, característica que permite linealizar la dinámica del sistema alrededor del punto de equilibrio  $x = x_o + \Delta x$ , como se muestra en la Ecuación 1 que representa el modelo linealizado Chow y Sanchez (2020) y Silva et al. (2018).

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \\ \Delta y = C \Delta x + D \Delta u \end{cases} \quad (1)$$

Donde  $x \in \mathbb{R}$ , representa el vector de estado del sistema,  $y \in \mathbb{R}$  corresponde al vector de las salidas y  $u \in \mathbb{R}$  es el vector de las

variables de entrada. Además,  $A$  es la matriz de estado del sistema,  $B$  es la matriz de las señales de entrada o de controlabilidad,  $C$  es la matriz de las señales de salida o de observabilidad y  $D$  es una matriz que define la proporción de la entrada que aparece directamente en la salida.

Los valores propios de la matriz de estado  $A$  son aquellos que satisfacen la Ecuación 2 y 3. Por lo tanto, para cada valor propio  $\lambda_i$  se tiene dos vectores propios. En consecuencia, el vector propio derecho  $\phi_i$  es un vector columna con una longitud igual al número de estados. El vector propio izquierdo  $\psi_i$  es un vector fila (Pota, 2018; Silva et al., 2018).

$$(\lambda_i I - A) \phi_i = 0 \quad (2)$$

$$\psi_i^T (\lambda_i I - A) = 0 \quad (3)$$

Donde  $\lambda_i \in \mathbb{C}$  es el  $i$ -ésimo valor propio de la matriz  $A$ , permite determinar la estabilidad del sistema. El valor propio  $\lambda_i$  tiene la forma  $\sigma \pm j\omega$ . La parte real representa el amortiguamiento ( $\zeta$ ) y la parte imaginaria corresponde a la frecuencia de oscilación ( $f$ ) de un modo de oscilación que se presenta en la Ecuación 4 y 5 (Kundur, 1974; Mondal et al., 2020).

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (4)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (5)$$

Por medio del procesamiento de la matriz de señales de entrada  $B$  y la matriz de señales de salida  $C$  en conjunto con el vector propio para un modo de oscilación particular, es posible calcular el índice de controlabilidad del  $k$ -ésimo modo de oscilación relativo a la  $i$ -ésima entrada como lo establece la Ecuación 6. De manera semejante, se calcula el índice de observabilidad del  $k$ -ésimo modo de oscilación para la  $j$ -ésima salida se define de acuerdo con la Ecuación 7 (Kundur, 1974; Pota, 2018).

$$B'_{ki} = \psi(k, *) B(*, i) \quad (6)$$

$$C'_{jk} = C(j, *) \phi(*, k) \quad (7)$$

Por medio de las Ecuaciones 6 y 7 con la  $i$ -ésima señal de entrada de la matriz  $B$  y la  $j$ -ésima señal de salida de la matriz  $C$  se obtiene la controlabilidad y observabilidad del modo de oscilación. Que en conjunto forman el residuo del modo de oscilación como lo establece la Ecuación 8. Un caso particular, es cuando el residuo de un modo de oscilación es cero por alguno de los índices, por lo que se dice el modo de oscilación no es controlable o no es observable (Edrah et al., 2016; Oscullo y Gallardo, 2020a).

$$R_{ji} = C'_{jk} B'_{ki} \quad (8)$$

$R_{ji} \in \mathbb{C}$  el ángulo  $\theta$  del residuo del modo de oscilación da la dirección en la que se desplaza el lugar geométrico de las raíces de este. Por lo que, para incrementar la estabilidad del sistema se requiere incrementar la parte real del modo de oscilación en la dirección del complemento del ángulo  $\theta$ , como se muestra en la Figura 1. Mediante este desplazamiento del modo de oscilación se puede utilizarlo para la sintonización de los parámetros del PSS. Por lo tanto, el PSS contribuye al desplazamiento de los modos de oscilación críticos para incrementar el nivel de amortiguamiento. Por

consiguiente, el desplazamiento del valor propio se puede calcular mediante la Ecuación 9 (Edrah et al., 2016).

$$\Delta\lambda_i = -|R_i| \cdot K = \left| \lambda_i^{(1)} - \lambda_i^{(0)} \right| \quad (9)$$

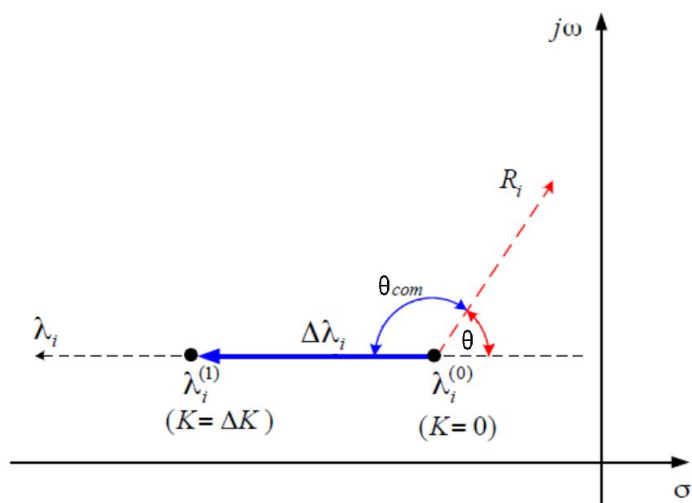


Figura 1. Esquemización del desplazamiento del modo de oscilación mediante el residuo

## 2.2 Cálculo del residuo

A partir de la Ecuación 9, se establece que el residuo  $R_{ji}$  indica la participación y sensibilidad del modo analizado ante las señales de entrada y salida seleccionadas para retroalimentar el dispositivo de control.

El cálculo de los residuos requiere de los valores propios de la matriz de estado  $A$ , los vectores propios y las matrices  $B$  y  $C$ . Sin embargo, como se indicó, PowerFactory no proporciona las matrices  $B$  y  $C$ . En Silva et al. (2018), se presenta una propuesta para la construcción de las matrices  $B$  y  $C$  en el Lenguaje de Programación DIGSILENT de PowerFactory. Por medio de un adecuado procesamiento de las columnas de la matriz  $B$  para el  $k$ -ésimo vector propio izquierdo y las filas de la matriz  $C$  con el  $j$ -ésimo vector propio derecho, es posible calcular el residuo del modo de oscilación de interés.

El comando análisis modal de PowerFactory permite obtener la matriz de estado  $A$  la cual se caracteriza por ser única para una configuración del sistema, a diferencia de las matrices  $B$  y  $C$ , ya que dependen de la selección de las entradas y salidas. La matriz  $B$  se la forma a partir de la variación de las variables de estado frente a un cambio en la potencia activa de la barra  $i$  seleccionada, con lo cual se determina la columna  $i$  de la matriz  $B$ , como lo establece la Ecuación 10.

$$\begin{cases} B_i \approx \Delta \dot{x}(\Delta t) \approx \frac{\Delta x(\Delta t) - \Delta x(0)}{\Delta t} \\ B_i = \frac{x(\Delta t) - x(0)}{\Delta t} \end{cases} \quad (10)$$

Considerando  $x(0) = 0$  y el paso de tiempo  $\Delta t = 0,0001s$  el error para determinar  $B_i$  de la Ecuación 10 es mínimo, este paso de tiempo es seleccionado con base en análisis presentados en Silva et al.

(2018) después de comparar la respuesta de la representación no lineal completa y el modelo linealizado en un sistema. La matriz  $C$  se forma según la disponibilidad o no de las variables de los elementos de salida, se define la  $i$ -ésima fila de esta matriz con ceros excepto por un término con valor "1" asociado con la existencia del  $i$ -ésimo generador.

### 2.3 Esquema de sintonización del PSS considerando el residuo

En la práctica, los sistemas toman medidas de control efectivas para amortiguar las oscilaciones. Los dispositivos generalmente utilizados para esta tarea son los estabilizadores de sistema de potencia que proporciona una señal de control suplementaria a los sistemas de excitación de los generadores.

El PSS es un dispositivo que permite desplazar los modos de oscilación de interés, a través de la inyección de su señal en el regulador de voltaje. Por medio de esta señal, se busca incrementar el nivel de amortiguamiento del o los modos de oscilación seleccionados, a través de los parámetros de sintonización calculados mediante el residuo de los modos de oscilación de interés.

La Figura 2 muestra la estructura y los parámetros del PSS modelado utilizando el lenguaje de simulación DIGSILENT (DSL) de PowerFactory. El bloque de ganancia, denotado por  $K_{pss}$ , permite amplificar la señal de entrada. La constante de tiempo del filtro washout ( $T_w$ ) permite filtrar la frecuencia de la señal de entrada a frecuencias en el rango de los modos de oscilaciones de interés. Para el estudio esta constante de tiempo se establece en 10 segundos. Por otro lado, se utilizan filtros denominados bloques de compensación de fase de adelanto y atraso por medio de los cuales se busca desplazar el modo de oscilación seleccionado a fin de que alcance un amortiguamiento mayor en el segundo cuadrante del plano complejo en función de la magnitud del residuo. Un adecuado procesamiento de esta información hace posible obtener cada uno de los parámetros de sintonización del PSS aplicando las Ecuaciones 11 a 15, como se establece en Oscullo y Gallardo (2020a) y Edrah et al. (2016).

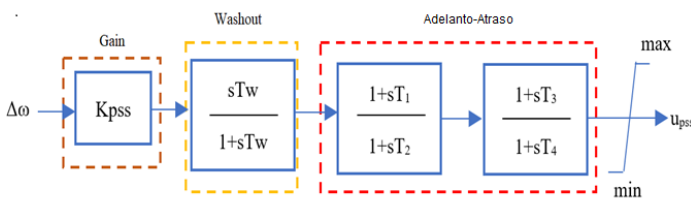


Figura 2. Estructura del tipo de PSS utilizado

$$\sigma_{selec} = \frac{\zeta_{selec} * w_i}{\sqrt{1 - \zeta_{selec}^2}} \quad (11)$$

$$|\Delta\lambda_i| = |\sigma_i - \sigma_{selec}| \quad (12)$$

$$K_{PSS} = \frac{|\Delta\lambda_i|}{|R_i * (\pi - \theta)|} \quad (13)$$

$$T_k = \frac{\sqrt{1 + \sin(\frac{\pi - \theta}{2})}}{w_i \sqrt{1 - \sin(\frac{\pi - \theta}{2})}}, \quad \text{siendo } k \text{ impar} \quad (14)$$

$$T_l = \frac{1 - \sin(\frac{\pi - \theta}{2})}{1 + \sin(\frac{\pi - \theta}{2})} * T_k, \quad \text{siendo } l \text{ par} \quad (15)$$

Donde  $K_{PSS}$  y las constantes de tiempo  $T_k, T_l$  del PSS se sintonizan mediante el ángulo  $\theta$  del residuo  $R_i$  del  $i$ -ésimo modo seleccionado, a fin de que todos los modos de oscilación del sistema alcancen el nivel de amortiguamiento deseado  $\zeta_{selec}$  para la red eléctrica. Entonces, con la sintonización de los parámetros del PSS se busca desplazar la parte real del modo  $\lambda_i$  hacia la izquierda en el plano complejo, como se indica en la Figura 1. Cada constante de tiempo del bloque de adelanto-atraso por medio de los ángulos de los residuos de diferentes modos de oscilación permite ampliar las frecuencias sensadas por el PSS a través de más bloques de adelanto-retraso, sin embargo, de acuerdo con la práctica se observa que con dos bloques de adelanto-retraso es posible incrementar el nivel de amortiguamiento para esta clase de PSS (Rohit et al., 2021).

### 3. PROPUESTA DE CÁLCULO DE RESIDUOS

Con base en lo indicado, en la sección anterior para calcular los residuos de un modo de oscilación de interés en PowerFactory, se requiere obtener la matriz de estado  $A$ , los vectores propios izquierdo y derecho obtenidos al ejecutar el comando análisis modal (ComMod\*). Adicionalmente, es necesario construir la matriz de señales de entradas  $B$  y la matriz de señales de salidas  $C$  y estructurarlas apropiadamente. Por medio de las cuales se utilizan las Ecuaciones 6 y 7 para obtener el residuo y aplicarlo para el desplazamiento del modo seleccionado, por otra parte, calculando los parámetros del PSS con las Ecuaciones 11 a 15 permite determinar los parámetros de sintonización del PSS.

En la variable de estado del modo de oscilación seleccionado en este trabajo, se considera la velocidad del generador, gracias a la información que PowerFactory proporciona en el archivo de texto *VariableToldx\_Amat.txt*. Con esto, se puede utilizar la variable de estado que requiera el usuario. Todo este procesamiento de información se ha implementado en un código DPL que automatice la obtención del residuo del modo de oscilación deseado.

La Figura 3 presenta la metodología que permite obtener el residuo, en la cual mediante el análisis modal, se obtiene tanto los valores propios y vectores propios del modo de oscilación seleccionado. Y con la fila o columna correspondiente de las matrices  $B$  y  $C$  procesadas respectivamente para la variable de estado monitoreada para el análisis.

#### 3.1 Programación DPL para el residuo

Esta sección presenta las consideraciones particulares del código de programación implementado en PowerFactory mediante el cual permite calcular los residuos para una red eléctrica, mediante el comando de análisis modal en la programación DPL en conjunto con programación en lenguaje Python.

Mediante la combinación de los dos lenguajes de programación es posible la importación y exportación del script para el cálculo de los residuos ante nuevas versiones del software, situación que debe ser manejada adecuadamente en las versiones de Python, debido a que por un lado PowerFactory maneja un rango limitado de estas

versiones y por otro lado, existe la posibilidad de la modificación de ciertos comandos o librerías entre cada versión de Python.

### 4. SISTEMAS DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La propuesta planteada para el cálculo del residuo se aplica a dos sistemas de prueba que se caracterizan de acuerdo con Cañizares et al. (2017) por ser sistemas multimáquina y presentar uno o varios modos de oscilación poco amortiguados cuando no actúan los PSSs. En la Tabla 1, se presenta los modos de oscilación para los sistemas de prueba seleccionados. Los resultados y los datos de los sistemas estudiados, el lector lo puede obtener del enlace <https://github.com/jaoscullo/My-PowerFactory>.

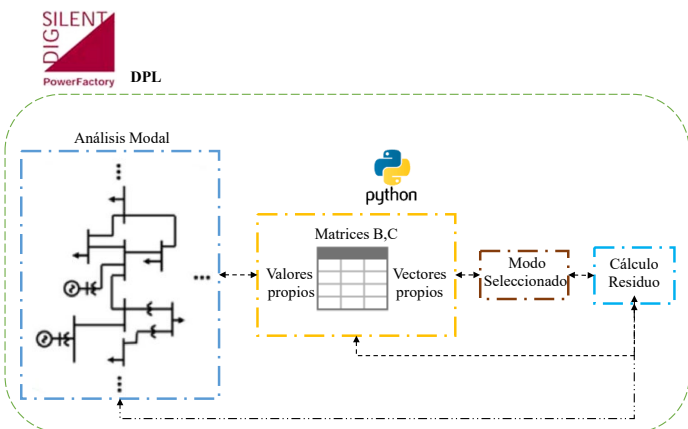


Figura 3. Metodología de Cálculo del Residuo

Para realizar el análisis modal en PowerFactory se requiere ejecutar el objeto *ComMod\** en conjunto con el cálculo de las condiciones iniciales de la red eléctrica mediante el objeto *ComInc\**. Una vez ejecutados, es posible configurar la exportación de la matriz de estado del SEP (*Amat.mtl*), valores propios (*Evals.mtl*), vectores propios: izquierdo (*IEval\_Amat.mtl*) y derecho (*rEval\_Amat.mtl*) para que se almacenen en una ruta personalizada por el usuario. Cabe mencionar que estos archivos tienen una estructura establecida por el software PowerFactory de DIGSILENT.

Como los PSS son dispositivos de control ubicados en el sistema de excitación de los generadores y dado que PowerFactory permite monitorear a selección del usuario en cada barra la velocidad del rotor del generador conectado a la misma. No obstante, si el usuario considera, se podría seleccionar otra variable de estado de acuerdo a las necesidades del análisis. En este trabajo, para la programación de la matriz *B* cuya columna *j*-ésima es necesario considerar la variación de la potencia en las barras seleccionadas por el usuario, mediante el comando selección general *SetSelect\**, en las cuales esté activa la variable de estado velocidad del generador. De acuerdo con la Ecuación 10, se considera la conexión/desconexión mediante el objeto *EvtSwitch\** en un  $\Delta t = 0,0001s$  a través de un interruptor. (*ElmTerm\**) una carga móvil de 100 MW.

En el caso de la construcción de la fila *i*-ésima de la matriz *C*, su tamaño depende del número de barras seleccionadas por el usuario mediante el comando selección general (*SetSelect\**), donde el valor "1" indica la presencia del PSS del generador conectado en la misma, caso contrario se colocará "0".

Con esta información, es posible determinar el residuo a través de las Ecuaciones 6 a 8, donde el *k*-ésimo vector propio izquierdo y derecho de cada valor propio del modo de oscilación de interés son obtenidos de la lectura de los archivos "Evals.mtl", "IEval\_Amat.mtl" y "rEval\_Amat.mtl", respectivamente.

**Tabla 1.** Características de los Sistemas de Prueba

| Sistema | Barras | Gen. | Líneas Transformadores | Modos de Oscilación                             |
|---------|--------|------|------------------------|-------------------------------------------------|
| 1       | 7      | 5    | 7                      | Modos de poca controlabilidad.                  |
| 2       | 66     | 16   | 80                     | Locales e interárea escaza coordinación de PSS. |

En el contexto del análisis modal, los modos de oscilación se clasifican en locales, intraplanta e interárea. Los modos locales se presentan cuando algunos generadores de un área delimitada oscilan respecto al resto de generadores del sistema, el rango de frecuencia típico es del orden de 1 a 2 Hz, se caracterizan en que estas oscilaciones son observables por mediciones locales. Los modos de oscilaciones interárea se presentan en las oscilaciones de un grupo de máquinas sincrónicas de una parte del sistema respecto a un grupo de máquinas de otra parte del sistema interconectadas a través de vínculos que tienden a congestionarse, el rango típico de frecuencia es del orden de 0,1 a 1 Hz.

Los modos de oscilación intraplanta se presentan para las oscilaciones entre generadores de una misma planta siendo la frecuencia de los mismos del orden de 2 a 3 Hz.

A continuación, se presenta la distribución de los distintos dispositivos y elementos de cada uno de los sistemas de prueba:

#### 4.1 Sistema equivalente sudeste Brasil

En la Figura 4, se presenta el diagrama equivalente de 7 barras del sistema eléctrico sureste brasileño, el cual está conformado por cinco generadores. Este sistema se caracteriza por presentar modos de oscilación interárea, los cuales tienen problemas de controlabilidad y observabilidad. Por lo indicado, resulta interesante considerar el uso del residuo para establecer el desplazamiento de los modos de oscilación a la zona estable.

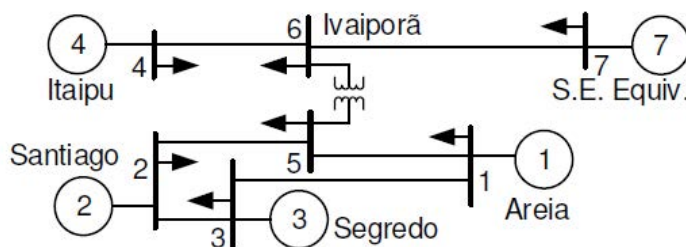


Figura 4. Diagrama Unifilar del sistema equivalente sudeste brasileño 7B5G (Cañizares et al., 2017)

### 4.2 Sistema New York-New England

El sistema de prueba New York-New England de la Figura 5 es uno de los sistemas más utilizado en la literatura especializada sobre el amortiguamiento de los modos de oscilación, se conforma por tres áreas fuertemente malladas, 66 barras, 16 generadores, 28 transformadores, 52 líneas de transmisión. Los modos de oscilación local e interárea caracterizan la estabilidad del sistema y resulta un reto interesante para la sintonización de los PSSs, considerando la determinación de los residuos de los modos de oscilación de interés.

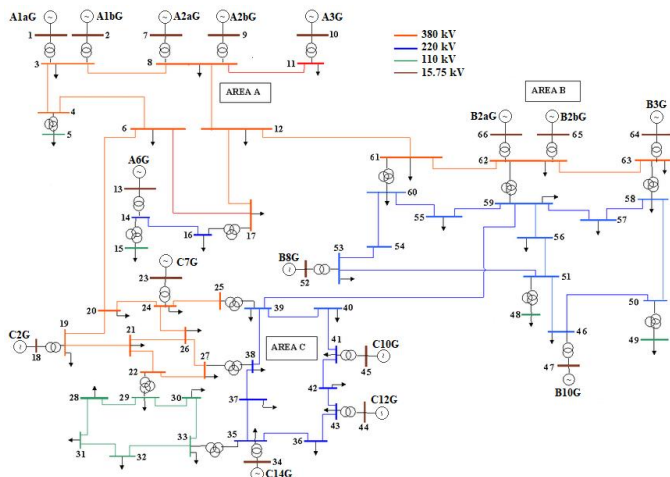


Figura 5. Diagrama Unifilar del sistema New York-New England (Oscullo y Gallardo, 2020b)

### 4.3 Caso: Sistema Equivalente Sudeste Brasil

Utilizando las herramientas desarrolladas para determinar el residuo y dinámica de los modos de oscilación críticos, en la Figura 6 (a), se presenta la dinámica de los modos de oscilación del sistema, tanto para el escenario sin PSS y escenario con los PSS sintonizados mediante el uso del residuo de los modos de oscilación críticos. Los modos de oscilación inestables y de baja frecuencia de acuerdo con Cañizares et al. (2017) son poco controlables al utilizar factores de participación para la sintonización de PSS. Sin embargo, mediante el uso de los residuos se logra alcanzar un nivel robusto de estabilidad, los modos alcanzan un amortiguamiento del 10%.

En la Figura 6(b) se muestra el módulo de los residuos de uno de los dos modos de oscilación crítico donde los generadores  $G_1$  a  $G_3$  tienen la mayor participación que corresponde a los modos de oscilación resaltados que presenta un nivel de amortiguamiento de -0,99, es decir es inestable por lo que se encuentra en el primer cuadrante del plano complejo, con una frecuencia de 1,13 Hz como puede observar en la Figura 6 (a).

Como se presenta en la Figura 7, la simulación en el dominio del tiempo de la variable potencia activa del generador  $G_4$  para el caso de que el sistema se somete a un cortocircuito en la línea 4-6 a los 0,5 s y despejada a los 0,6 s en el escenario con PSS alcanza rápidamente una operación estable al segundo de la simulación. Para el caso del escenario sin PSS, el sistema es inestable ante

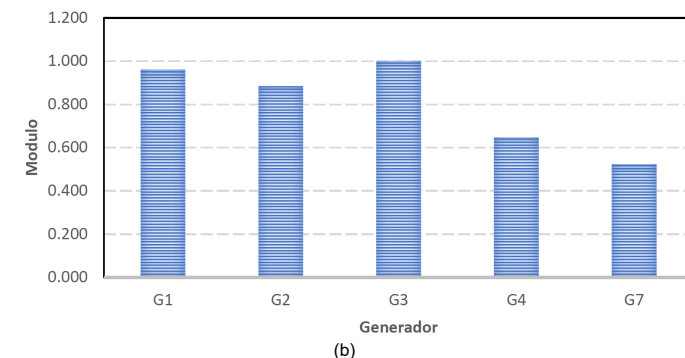
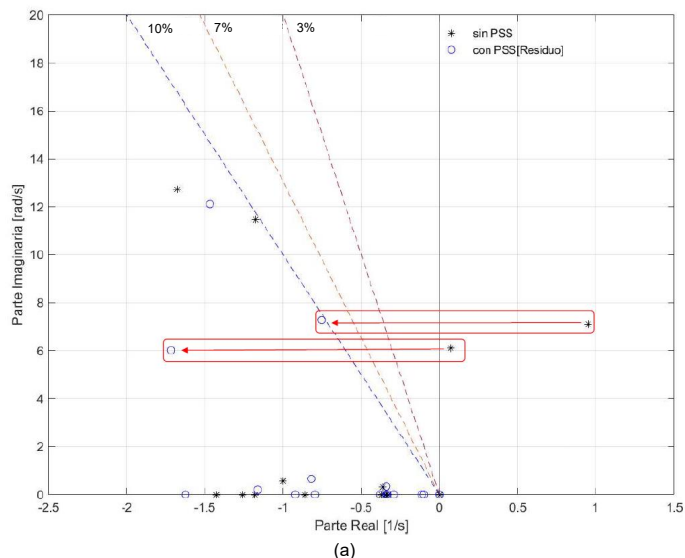


Figura 6. Modos de Oscilación y Residuos del Sistema Equivalente Sudeste Brasil

esta perturbación, como se observó en la Figura 6 (a) el sistema presenta modos de oscilación inestables.

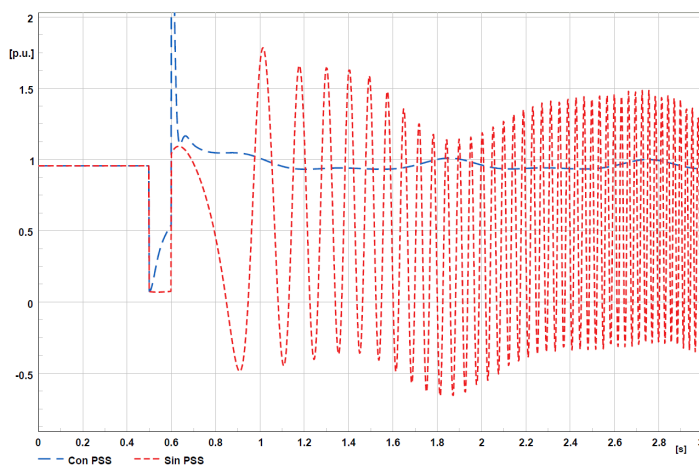


Figura 7. Respuesta de Potencia del  $G_4$  del Sistema Equivalente Sudeste Brasil

### 4.4 Caso: Sistema New York-New England

Para investigar la aplicabilidad de las herramientas computacionales desarrolladas en un sistema eléctrico más grande, el cual presenta una mayor cantidad de modos de oscilación, y de acuerdo



con la literatura especializada es un sistema que demanda una alta coordinación en la sintonización de los PSS de los generadores que los tengan disponibles, para el caso del estudio se considera que todos generadores cuentan con PSS. En la Figura 8 (a), es posible observar la distribución de los modos de oscilación para el escenario sin PSS, que muestra tres modos de oscilación interárea con frecuencia promedio de 0,62 HZ y niveles de amortiguamiento bajos e incluso inestables.

En la Figura 8 (b), se presenta el módulo de los residuos correspondientes al modo de oscilación inestable que presenta un nivel de amortiguamiento de -0,46 %. Situación que requiere de un nivel de controlabilidad y observabilidad alto como lo indica Cañizares et al. (2017). No obstante, con el uso de los residuos para la sintonización de los PSS se alcanza un nivel de amortiguamiento de todos los modos de oscilación sobre el 10.

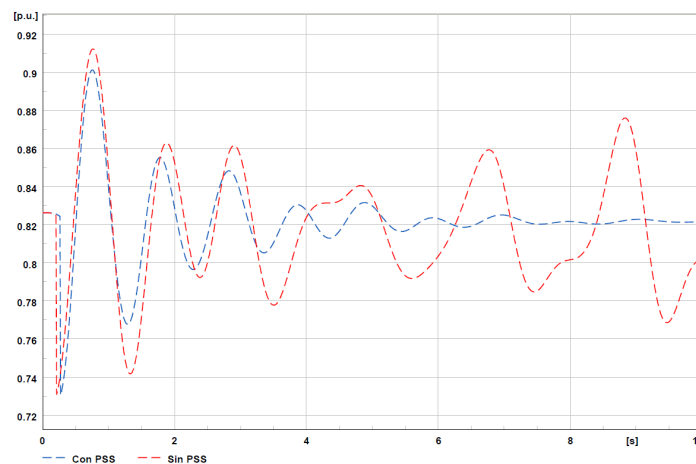


Figura 9. Respuesta de Potencia del  $C_{7G}$  del sistema New York-New England

### 5. CONCLUSIONES

En este estudio, se demostró que mediante un procesamiento adecuado de variables y la construcción de matrices, es posible programar una herramienta para calcular los residuos de los modos de oscilación de interés en una condición operativa de un SEP utilizando un software de ingeniería. Adicionalmente, se evidenció que el residuo de un sistema eléctrico indica el nivel de controlabilidad y observabilidad de los modos de oscilación críticos y puede ser utilizados para determinar los parámetros de sintonización de elementos de control de oscilaciones, como los PSS.

Al identificar el residuo más alto del modo de oscilación analizado, es posible ubicar, activar y sintonizar los PSS de los generadores asociados a dicho residuo. Esta situación facilita alcanzar un nivel de amortiguamiento seleccionado por el usuario, basado en la literatura especializada que sugiere un 10% para sistemas pequeños y un 7% para sistemas de gran escala. Por medio de los residuos, se logra desplazar los modos de oscilación del sistema.

Este trabajo demostró que con un procesamiento adecuado de variables de interés, es posible automatizar la construcción de las matrices  $B$  y  $C$ . Estas matrices pueden ser utilizadas para determinar variables que contribuyan a mejorar el nivel de estabilidad de un sistema eléctrico. Asimismo, pueden ser utilizadas para resolver diferentes problemas de ingeniería eléctrica dentro del entorno de software de ingeniería como PowerFactory, manteniendo una interfaz amigable con el usuario.

### AGRADECIMIENTOS

Extendemos el agradecimiento al Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Vinculación de la Escuela Politécnica Nacional, ya que este trabajo ha sido desarrollado dentro del proyecto PII-DEE-2022-01 “Diseño de herramientas para analizar la dinámica de la estabilidad de pequeña señal de un SEP empleando el análisis modal del programa PowerFactory de DiGSILENT”.

### REFERENCIAS

Cañizares, C., Fernandes, T., Geraldi, E., Gerin-Lajoie, L., Gibbard, M., Hiskens, I., Kersulis, J., Kuiava, R., Lima, L., De-Marco, F., Martins, N., Pal, B. C., Piardi, A., Ramos, R.,

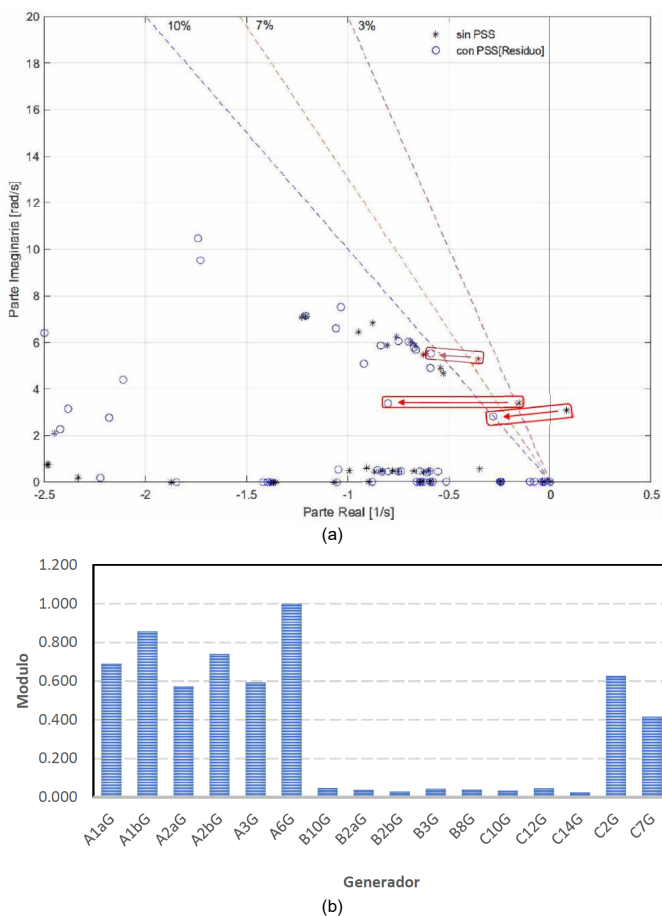


Figura 8. Modos de Oscilación y Residuos del Sistema New York-New England

En el escenario sin PSS, se considera una falla trifásica en la línea B-C a los 0,5 s y se resuelve a los 0,6 s. Además, se observa que el sistema, al no contar con los PSS, presenta oscilaciones que conducen a la inestabilidad del sistema. Con el desplazamiento de los modos de oscilación críticos por medio del residuo, como se muestra en la Figura 8 (a), la respuesta en el dominio del tiempo de la potencia del generador  $C_{7G}$ , que tiene activado su PSS, muestra que las oscilaciones se amortiguan y presenta una operación cuasi-estacionaria a partir de los 6 segundos, como se ilustra en la Figura 9.

Dos Santos, J., Silva, D., Singh, A., Tamimi, B. & Vowles, D. (2017). Benchmark Models for the Analysis and Control of Small-Signal Oscillatory Dynamics in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(1), 715-722. <http://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2561263>

Chow, J., & Sanchez, J. (2020). *Power System Modeling, Computation and Control*. IEEE Press.

DIgSILENT (2022). *PowerFactory User's Manual Version 2022 DIgSILENT GmbH*. Gomaringen.

Edrah, M., Lo, K., & Anaya-Lara, O. (2016). Reactive power control of DFIG wind turbines for power oscillation damping under a wide range of operating conditions. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(15), 3777-3785. <http://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0132>

Kundur, P. (1974). *Power System Stability and Control*. McGraw Hill.

Mondal, D., Chakrabarti, A., & Sengupta, A. (2020). *Power System Small Signal Stability and Control*. Elsevier Academic Press.

Oscullo, J., & Gallardo, C. (2020a). Residue Method Evaluation for the Location of PSS with Sliding Mode Control and Fuzzy for Power Electromechanical Oscillation Damping Control. *IEEE Latin America Transactions*, 18(1), 24-31. <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9049458>

Oscullo, J., & Gallardo, C. (2020b). Adaptive tuning of power system stabilizer using a damping control strategy considering stochastic time delay. *IEEE Access*, 8(1), 1-11. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3004067>

Pizarro-Galvez, S., Pulgar-Painemal, H., & Hinojosa-Mateus, V. (2014). Chapter 10: Parameterized Modal Analysis Using DIgSILENT Programming Language. *PowerFactory Applications for Power System Analysis*, 1(1), 221-248. [http://doi.org/10.1007/978-3-319-12958-7\\_10](http://doi.org/10.1007/978-3-319-12958-7_10)

Pota, H. (2018). *The Essentials of Power System Dynamics and Control*. Springer Nature.

Rohit, C., Yadav, K., & Darji, P. (2021). Optimal Placement of SVC using Residue Technique and Coordination with PSS for Damping Inter-Area Oscillations. *31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 1(1), 21507508. <http://doi.org/10.1109/AUPEC52110.2021.9597791>

Silva-Saravia, H., Pulgar-Painemal, H., & Wang, Y. (2018). Chapter 7: Determining Wide-Area Signals and Locations of Regulating Device to Damp Inter-Area Oscillations Through Eigenvalue Sensitivity Analysis Using DIgSILENT Programming Language. *Advanced Smart Grid Functionalities Based on PowerFactory*, 1(1), 153-179. [http://doi.org/10.1007/978-3-319-50532-9\\_7](http://doi.org/10.1007/978-3-319-50532-9_7)

## BIOGRAFÍAS

**José, Oscullo Lala**, Doctor en Ingeniería eléctrica por la Escuela Politécnica Nacional en 2022. Profesor del Departamento de Energía Eléctrica de la Facultad de Ingenierías Eléctricas y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus intereses son el uso de minería de datos para la simulación y análisis de estabilidad de un sistema eléctrico. <http://orcid.org/0000-0001-5903-0173>

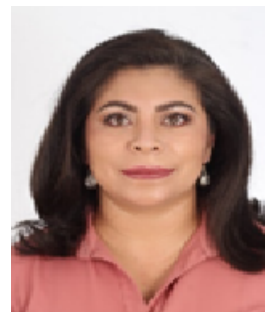


5903-0173

**Roberto, Jumbo**, Ingeniero en Electrónica y Control de la Escuela Politécnica Nacional en 2010. Trabaja como ingeniero de diseño eléctrico para la empresa constructora CPP. Sus intereses de investigación son el análisis de estabilidad eléctrica y la movilidad eléctrica. <http://orcid.org/0009-0008-3755-5540>



**Patricia, Otero Valladares**, Master en Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional en 2017. Profesora del Departamento de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus intereses de investigación son la modelación de las máquinas eléctricas. <https://orcid.org/0000-0002-8893-9893>



# Development of Spectrophotometric Method to Assay Phenylephrine Hydrochloride in Pure and in its Pharmaceutical Forms Using Diazotized Sulphanilic Acid

Ahmed, Hanan H. <sup>1,\*</sup> ; Mohammed, Salim A. <sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup>University of Mosul, College of Science, Department of Chemistry, Mosul, Iraq

**Abstract:** This work described a simple and sensitive spectrophotometric procedure for estimating phenylephrine hydrochloride in pure and in its pharmaceutical using diazotized sulphanilic acid as a coupling agent in alkaline medium of sodium carbonate solution. The resulting yellow azo-dye displayed an absorption maximum at 441 nm. The calibration graph was linear and compatible to Beer's law over the concentration range 0.2-20 µg/mL with coefficient estimated ( $r^2=0.9996$ ). The values of molar absorptivity and the sensitivity of Sandell's index were calculated and equal to  $8.51 \times 10^3$  l/mol.cm and  $0.0239$  µg/cm<sup>2</sup>, respectively. The values of detection limit (LOD), quantification limit (LOQ) and the range of relative error percentage were estimated and found to be 0.0050, 0.0166 µg/mL and -0.374% to -0.147%, respectively. The precision (represented by RSD) was also calculated and found to be in the range  $\pm 0.037$  to  $\pm 0.28$ . The suggested procedure was useful successfully to the assay of phenylephrine hydrochloride in injection, drops and syrups. No interferences were observed from common additives found in pharmaceutical preparations. The yellow color of the product was highly stable and did not show a significant change in absorbance up to 60 min.

**Keywords:** Phenylephrine Hydrochloride, Diazotization and Coupling Reaction, Sulphanilic acid, Spectrophotometry

## Desarrollo de un Método Espectrofotométrico para Analizar el Clorhidrato de Fenilefrina en Forma Pura y Farmacéutica Utilizando Ácido Sulfanílico Diazotizado

**Resumen:** Este trabajo describió un procedimiento espectrofotométrico simple y sensible para estimar el clorhidrato de fenilefrina en estado puro y en sus formas farmacéuticas usando ácido sulfanílico diazotado como agente de acoplamiento en medio alcalino de solución de carbonato de sodio. El colorante azoico amarillo resultante mostró un máximo de absorción a 441 nm. El gráfico de calibración fue lineal y compatible con el mínimo de Beer en el intervalo de concentración de 0.2-20 µg/mL con determinación del coeficiente ( $r^2=0.9996$ ). Los valores de absorptividad molar y la sensibilidad del índice de Sandell fueron calculados y fueron de  $8.51 \times 10^3$  l/mol.cm y  $0.0239$  µg/cm<sup>2</sup>, respectivamente. Los valores del límite de detección (LOD), el límite de cuantificación (LOQ) y el rango del porcentaje de error relativo se estimaron y resultaron ser 0.0050, 0.0166 µg/mL y -0.374 % a -0.147 %, respectivamente. También se calculó la precisión (representada por RSD) y se encontró que estaba en el rango de  $\pm 0.037$  a  $\pm 0.28$ . El procedimiento sugerido fue útil con éxito para el ensayo de clorhidrato de fenilefrina en inyección, gotas y jarabes. No se observaron interferencias de los aditivos comunes que se encuentran en las preparaciones farmacéuticas. El color amarillo del producto fue muy estable y no mostró cambios significativos en la absorbancia hasta los 60 min.

**Palabras clave:** Clorhidrato de fenilefrina, diazotización y reacción de acoplamiento, ácido sulfanílico, espectrofotometría

### 1. INTRODUCTION

Phenylephrine hydrochloride (PPh) is one of the group medicines called sympathomimetics, chemically known as (R)-1-(3-hydroxyphenyl)-2-methyl amino ethanol

hydrochloride. It is a white crystalline powder with the chemical formula  $C_9H_{13}NO_2$  and molecular weight 203.66 g/mol, used as a nonspecific, decongestant and allergic conjunctivitis, sinusitis and nasopharyngitis, as it works by motivating alpha receptors in areas of specific of the body

\*hanan-alali@uomosul.edu.iq  
Recibido: 23/02/2023  
Aceptado: 09/11/2023  
Publicado en línea: 09/02/2024  
10.33333/tp.vol53n1.04  
CC 4.0

(British Pharmacopoeia, 2022), It can relieve symptoms but cannot release the cause of the symptoms or speed recovery (Ahmed and Mohammed, 2023).

Several methods were described in the literature for PPh estimation in its pharmaceutical preparations and in the biological fluids. Most of these procedures based on the formation of diazotized PPh and coupling with 2,4-dinitroaniline (Hasan et al., 2020), clonazepam in presence of  $\text{NH}_4\text{OH}$  to form a yellow solution measured at 466 nm. (Alteemi and Kadim, 2020), 2-aminothiazole in alkaline medium and followed by dispersive liquid-liquid microextraction method (Mzban et al., 2020), sulfacetamide sodium in alkaline medium of  $\text{NaOH}$  and the absorbance was measured at 425nm (Wasan, 2019), metoclopramide in an alkaline medium to give an intense orange colored product ( $\lambda_{\text{max}}$  at 470) (Al-Abachi and Abed, 2015), p-nitroaniline (Ibraheem, 2009) and 2-aminobenzothiazole (Othman and Abdul Fatah, 2009). Others based on the oxidative coupling reactions of PPh with N,N-dimethyl-p-phenylenediamine in the presence of sodium persulphate (Radhia et al., 2021), N,N-dimethyl-p-phenylenediamine with  $\text{FeCl}_3$  in alkaline media (Ahmed et al., 2020) and with 4-aminoantipyrine and potassium ferricyanide (Aljeboree and Alshirifi, 2018). Other methods based on the oxidation of PPh either with an excess of bromosuccinamide (NBS) then the residual NBS was estimated by bleaching the color of methyl orange dye in acidic medium of  $\text{HCl}$  (1mL, 1M) (Zakaria, 2021) nor by adding an excess of chloramine-T and the residual was estimated by bleaching the color of indigo caramine dye (Battu et al., 2018) and PPh was also estimated using spectrophotometric method via flow injection analysis (Al-Abachi and Abed, 2015) and charge transfer complex formation with haematoxylin in alkaline medium (Ahmed and Amin, 2007).

Several analytical techniques have also been published for PPh estimation, these techniques include: RP-HPLC-PDA method (Nagarjuna et al, 2020), high-performance thin layer chromatography (Ragab et al., 2019), chemometric-assisted spectrophotometry and RP-HPLC (Al-Shaalan, 2010), derivative spectrophotometric method (Aljeboree and Alshirifi, 2019), voltammetry (Yagmur, 2018), Conductometric titration method (Hasan et al., 2016). Finally, the dual wavelength method was used for the simultaneous estimation of PPh in bulk and pharmaceutical dosage forms (Suratiya and Pancholi, 2014). However, many of these methods suffer from various limitations, for instance, low stability of the resulting product, low sensitivity and time consuming. Others required solvent extraction, several management steps, temperature control and expensive devices which may not be presented in the laboratory.

In the present work, a very sensitive spectrophotometric method is described for the estimation of PPh drug, which reacts instantly with sulphanilic acid diazotized in an alkaline medium to produce a yellow-colored product with a maximum absorption peak at 441 nm. The method has been successfully applied to determine PPh in some of pharmaceutical preparations.

## 2. EXPERIMENTAL

### 2.1 Apparatuses

A Jasco V-630 digital double beam UV-Vis spectrophotometer equipped with 1.0-cm matched fused silica cells and Bp3001 professional bench top pH meter devices were used for all absorption spectra recording and pH measurements, respectively. Electronic balance ABS 120-4 kern & Sohn Gmbav, was also used for weighing chemical materials.

### 2.2 Reagent and chemical solutions

High pure chemical materials were used in all experiments.

Standard PPh solution (100 ppm): A 0.01 g of PPh substance obtained from the (SDI) company (for drug industries and medical appliances, Samarra-Iraq) was dissolved in a quantity of distilled water (DW). The solution was transferred to a 100 mL standard flask and the volume was then completed to the mark using DW.

Sulphanilic acid solution (0.02 M): A 0.3464 g of sulphanilic acid was dissolved in 100 mL of DW using standard flask.

Sodium nitrite (0.02M): A 0.1380 g of sodium nitrite (Analar), was weighted and dissolved in a quantity of DW and the volume was then finalized to 100 mL with the same solvent.

Hydrochloric acid (0.1 M): A 0.86 mL of (11.6 M) concentrated hydrochloric acid (Honey well) was diluted to 100 ml using DW.

Sodium carbonate solution (1 M): A 10.5988 g of sodium carbonate was weighed and dissolved in 20 mL of DW. The solution was placed in a standard flask of 100 mL and then diluted with DW.

### 2.3 Essential procedure

To a series of 25 mL standard flasks, a 1mL of sulphanilic acid, 1 mL of 0.02 M of sodium nitrite and 0.5 mL of 0.1 M hydrochloric acid were added to each flask and mixed well. After waiting for 10 minutes, an aliquot of PPh containing 0.2-20  $\mu\text{g ml}^{-1}$  and 1 mL of 0.5 M sodium carbonate solution were added. The contents of the flasks were diluted to the mark with DW and the absorbance of the sample was recorded at the selected wavelength 441 nm versus blank solution.

### 2.4 Analysis of PPh in the pharmaceutical preparations

#### 2.4.1 Nose drops analysis

-Nasofen (1%) solution: A 1.0 mL of nasofen drop (1%) (pioneer company) was taken and placed in a standard flask of 100 ml, then the volume was supplemented to the mark with DW to obtain a solution of drug containing 100  $\mu\text{g/mL}$  of PPh.

-Nasophrine (100  $\mu\text{g/mL}$ ) solution: A 0.25 mL of nasophrine drop (0.25%) (obtained from SDI, Samarra-Iraq) was withdrawn and placed in a 100 mL standard flask, the volume was then supplemented to the mark by adding DW to obtain a solution of the nasophrine drop containing 100  $\mu\text{g/mL}$  of PPh.

#### 2.4.2 Syrups analysis

-Tussilate syrup (2.5 mg/5 mL) solution: A 5.0 mL of the tussilate syrup (SDI, Samarra-Iraq) was diluted to 50 mL with DW using standard flask to obtain a solution containing PPh its concentration 50  $\mu\text{g/mL}$  (Hasan et al., 2020).

-Achee syrup (2.5 mg/5 mL) solution: A 5.0 mL of the syrup solution (Brawn-Indian) was quantitatively transferred to a 50 mL standard flask and diluted with DW to the mark to get a solution containing 50  $\mu\text{g PPH/mL}$ .

2.4.3 PPh injection (500 µg/10 mL): Each ml the injection containing 100 µg of PPh /mL

An aliquot of the diluted drug solutions prepared (nasofen, nasophrine, tussilate and achee syrups and PPh injection) was then treated as the recommended procedure.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The effect of various analytical variables on the color development and the stability of the azo dye produced has been studied and optimized.

#### 3.1 Principle of the method

The principle of the proposed method depends on the reaction of sulphanilic acid with an equivalent amount of sodium nitrite in an acidic medium to form diazonium salt, which then coupled with PPh to produce a water soluble yellow azo dye gave maximum absorption at 441nm, as shown in the following equation (Figure 1).

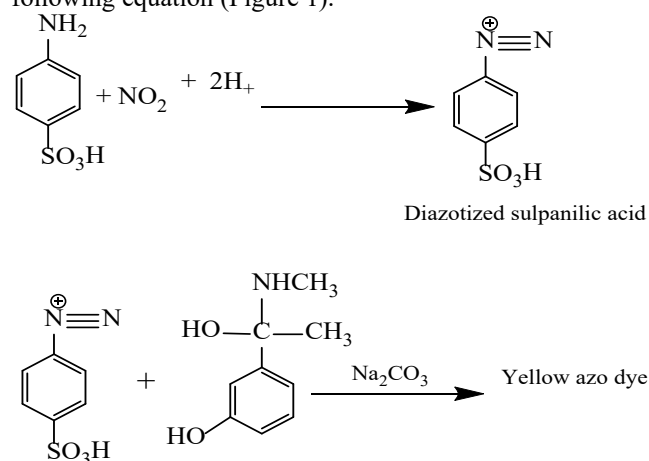


Figure 1. Mechanism of the Proposed reaction

Table 2. Effect of sulphanilic acid amount on absorbance

| Millilitre of Sulphanilic acid (0.02M) | Absorbance / µg of PPh added |        |        |        |        | r <sup>2</sup> |        |
|----------------------------------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|----------------|--------|
|                                        | 100                          | 150    | 200    | 250    | 300    |                |        |
| 0.3                                    | 0.0455                       | 0.0621 | 0.0824 | 0.1011 | 0.1211 | 0.1352         | 0.9979 |
| 0.5                                    | 0.0526                       | 0.0881 | 0.1263 | 0.1569 | 0.1935 | 0.2361         | 0.9984 |
| 1.0                                    | 0.0772                       | 0.1158 | 0.1544 | 0.1930 | 0.2316 | 0.2652         | 0.9995 |
| 1.5                                    | 0.0753                       | 0.1127 | 0.1502 | 0.1880 | 0.2243 | 0.2533         | 0.9984 |
| 2.0                                    | 0.0711                       | 0.1077 | 0.1423 | 0.1768 | 0.1768 | 0.2382         | 0.9987 |

#### 3.5 Effect of base type and its amount

The influence of several quantities 0.3-2.5 mL of various bases (sodium hydroxide, potassium hydroxide, sodium carbonate and sodium bicarbonate) on the absorbance of azo dye has been studied and the results obtained revealed that the volume of 1ml of sodium carbonate solution (1 M) is the optimum because, it gives the best sensitivity (the highest absorption value), therefore, it has been adopted for the subsequent experiments.

#### Time effect on the color development

The resulting yellow-colored azo dye appears immediately after adding the alkaline solution of sodium carbonate and remains stable for at least 90 minutes.

#### 3.6 Order additions effect

#### 3.2 Effect of acid type on absorbance

The influence of several amounts 0.3 - 3.0 mL of various strong and weak acid solutions (0.1M) have been studied on the absorbance of azo dye. The results are shown in Table 1.

Table 1. Effect of various acids (1M) on absorbance of azo dye by using [300 µg of PPh + sulphanilic acid(1mL) + NaNO<sub>2</sub>(1mL) + NaOH (2mL)]

| Acids (0.1M)                   | Absorbance / mL of acid use |        |        |         |        |        |        |
|--------------------------------|-----------------------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
|                                | 0.3                         | 0.5    | 1.0    | 1.5     | 2.0    | 2.5    | 3.0    |
| HCl                            | 0.1591                      | 0.1722 | 0.1473 | 0.1001  | 0.1326 | 0.1236 | 0.100  |
| HNO <sub>3</sub>               | 0.1962                      | 0.1241 | 0.1095 | 0.0821  | 0.0903 | 0.0903 | 0.0907 |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 0.1217                      | 0.1293 | 0.1020 | 0.0967  | 0.0640 | 0.0640 | 0.0688 |
| CH <sub>3</sub> COOH           | 0.1236                      | 0.1251 | -0.017 | -0.0503 | 0.0162 | .0162  | 0.0091 |
| HCOOH                          | 0.1721                      | 0.1632 | 0.0801 | 0.0711  | 0.0412 | 0.0412 | 0.0210 |

The results in Table 1 reveal that 0.5 mL of hydrochloric acid at a concentration of 0.1 M gave the best absorbance value, so it was adopted for the next experiments.

#### 3.3 Reaction time effect

The influences of diazotized reaction time on the absorption intensity of the azo dye was carried out by measuring the absorption at different periods of time at laboratory temperature (25±2C°).

#### 3.4 Influence of sulphanilic acid amount

The influence of different amounts of sulphanilic acid as a diazotized agent on the absorption intensity of azo dye was carried out using 0.3-2.0 mL of 0.02 M sulphanilic acid. The data are summarized in Table 2 and indicated that 1.0 mL of 0.02M sulphanilic acid gave the high sensitivity (i.e. the highest absorbance value) of the resulted azo-dye and perfect estimated coefficient (r<sup>2</sup>=0.9995), so it was chosen for the following experiments.

The effect of different sequences of additions of the reaction components on the absorption intensity of azo dye was also examined. The experimental results shown in Table 3 revealed that the sequence of reactants according this order (sulphanilic acid + NaNO<sub>2</sub> + HCl + PPh + Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) at 441 nm was the optimum.

#### 3.7 Absorption Spectra

Under the ideal conditions of the procedure, a yellow azo dye was formed by coupling of PPh. with diazotized sulphanilic acid in alkaline solution of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. The resulting azo-dye displays maximum absorption at 441 nm versus the solution of blank which show a negligible absorption at this wavelength. Figure 2 shows the final absorption spectra.

#### 3.8 Reproducibility and Validity of Beer's law

A linear calibration graph was attained by plotting the absorbance against concentration of PPh which was compatible

Beer's law within the concentration range of 5 to 500 µg of PPh in a final volume 25 mL (i.e. 0.2-20 µg/mL) with estimated coefficient ( $r^2=0.9996$ ) As shown in Figure 3.

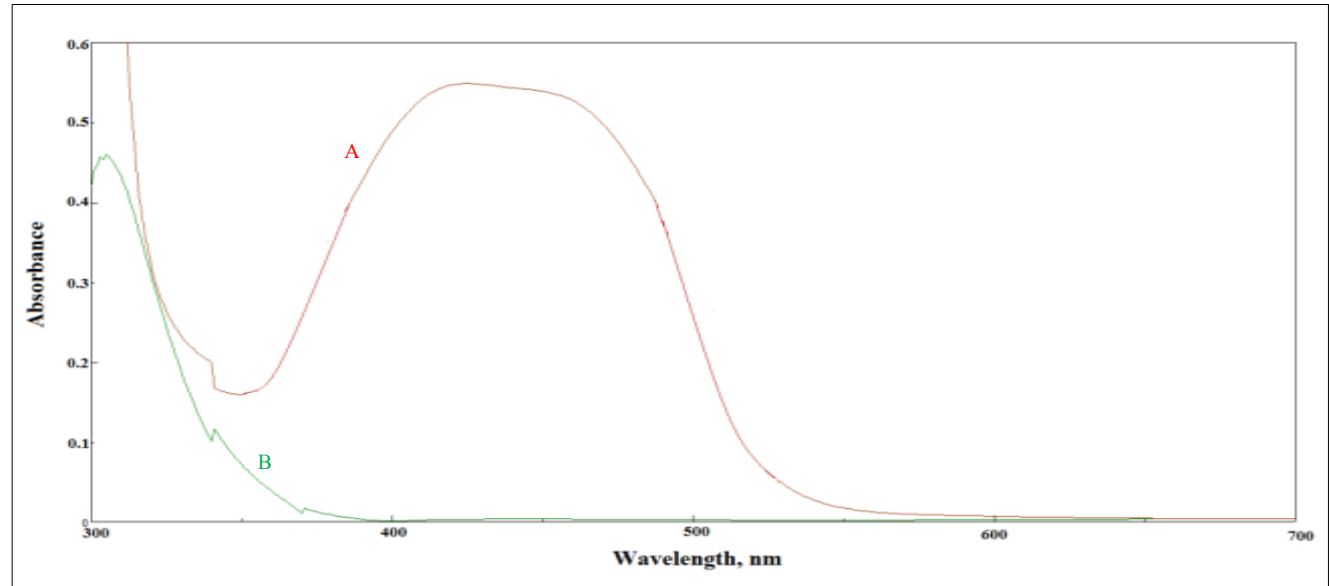


Figure 2. Absorption spectra of 4 µg/mL PPh treated according to the recommended procedure and measured Vs. (A) blank, (B) blank measured Vs. distilled water

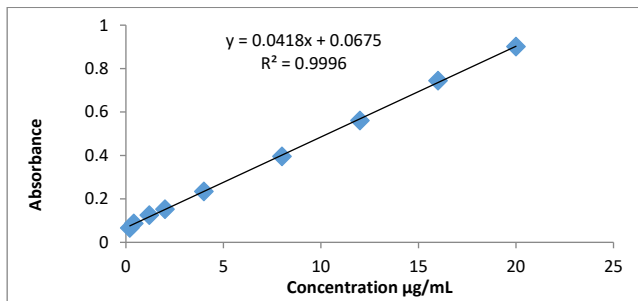


Figure 3. Calibration curve of PPh estimated using the proposed method

The molar absorptivity was estimated and equal to  $8.51 \times 10^3$  L/mol.cm, which corresponds to Sandell's sensitivity of  $.00239 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ . The detection and quantification limits (LOD) and (LOQ) were measured and established to be 0.0050 and 0.0166 µg/mL, respectively (International Conference on Harmonization, 2005). A relative error percentage and the relative standard deviation were calculated and set up to be in the range -0.374% to -0.147% and  $\pm 0.037$  to  $\pm 0.28$ , respectively. The stability constant (Ks) of the resulting product was also estimated (Azeez and Mohammed, 2022) and was equal to  $5.7984 \times 10^6$  L/mol (Hargis, 1988).

3.9 Azo dye stoichiometry

Under the optimized conditions of the essential procedure, Job's and molar ratio methods (Delevic, 1997) were used to clarify the correlation ratio of PPh with the diazotized sulphanilic acid (SA). Both methods were carried out by using the same concentrations of PPh and SA solutions ( $4.91 \times 10^{-4}$

Table 3. Order of addition effect

| Order number | Sequence of addition                                           | Absorbance |
|--------------|----------------------------------------------------------------|------------|
| I            | SA+HCl+NaNO <sub>2</sub> +PPH+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>  | 0.4820     |
| II           | SA+NaNO <sub>2</sub> +HCl+PPH+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>  | 0.5613     |
| III          | NaNO <sub>2</sub> +HCl+SA+PPH+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>  | 0.2771     |
| IV           | SA+NaNO <sub>2</sub> +HCl+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +PPH | 0.1435     |
| V            | HCl+SA+NaNO <sub>2</sub> +PPH+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>  | 0.2934     |
| VI           | HCl+NaNO <sub>2</sub> +SA+PPH+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>  | 0.1553     |

SA=Sulphanilic acid

M). The results of both methods are explained in Figure 4 reveal that the azo dye was formed by the reaction of PPh and diazotized SA in a ratio of 1:1.

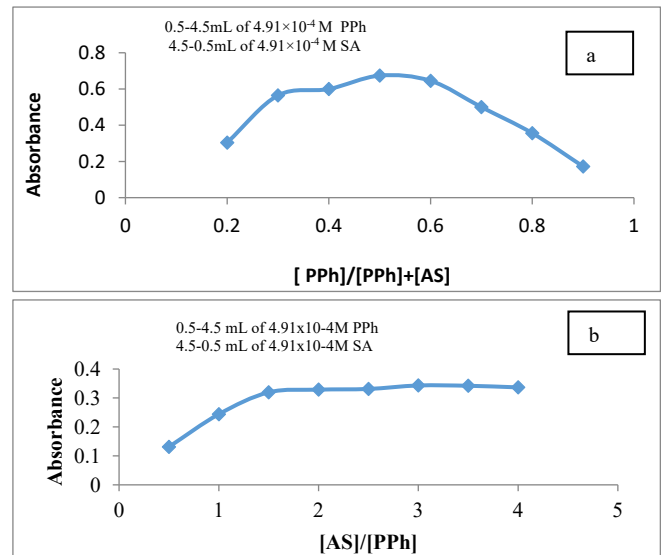


Figure 4. (a) Job and (b) molar-ratio plots for PPh– diazotized SA [PPh]= concentration of phenylephrine, [AS]= concentration of reagent

According to the results of stoichiometry study the stoichiometry of the resulting azo dye which formed through the diazotization and coupling reaction of PPh and salphanilic acid can be clarified as Figure 5.

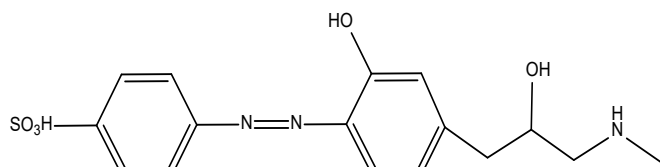


Figure 5. Yellow azo dye

### 10. Application of the method

The proposed method has been used for the analysis of PPh in its pharmaceutical forms (injection, drops, and syrups) from different origins and at three different quantities (50, 100, 300 µg). The results are listed in Table 4, it indicates that the proposed method is a suitable for determining PPh with an acceptable result.

To evaluate the results of the proposed method, a t-test has been investigated. The results in Table 2 reveal that the values

of t-exp. are less than the t-tabulated value (2.776) at the 95% confidence level and for four degrees of freedom (N=4) (Gary, 2004). The results indicated that the difference is statistically not significant, which confirms the success of applying the proposed method to estimate PPh in its drugs.

### 11. Standard additions method

In order to evaluate the selectivity of the proposed method and its success in estimating PPh in its pharmaceutical preparations, the standard additions method has been applied. The results are exemplified in Figure 6 and listed in Table 5, they indicate that the standard additions method agrees well with the results of the proposed method within an satisfactory range of error.

Table 4. Estimation of phenylephrine hydrochloride in the pharmaceutical forms

| pharmaceutical preparations          | Certified value     | PPh found (µg) | Recov.* (%) | RE.* (%) | RSD* (%) | Measured value* | t-exp <sup>a</sup> |
|--------------------------------------|---------------------|----------------|-------------|----------|----------|-----------------|--------------------|
| Phenylephrine.HCl injection (France) | 500 µg of PPh /10mL | 49.97          | 99.94       | -0.06    | 0.05     | 499.7 µg        | 0.18               |
|                                      |                     | 99.98          | 99.98       | -0.02    | 0.05     | 499.9 µg        | 0.89               |
|                                      |                     | 299.96         | 99.99       | -0.004   | 0.01     | 499.9 µg        | 1.00               |
| Nasofen drop (Pioneer)               | 1.0%                | 50.05          | 100.10      | 0.10     | 0.13     | 1.001%          | 0.59               |
|                                      |                     | 100.02         | 100.02      | 0.02     | 0.04     | 1.00%           | 1.01               |
|                                      |                     | 300.08         | 100.02      | 0.03     | 0.01     | 1.00%           | 1.03               |
|                                      |                     | 49.97          | 99.94       | -0.06    | 0.02     | 0.249%          | 2.65               |
| Nasophrine drop (SDI)                | 0.25%               | 99.89          | 99.89       | -0.11    | 0.04     | 0.249%          | 1.46               |
|                                      |                     | 299.28         | 99.76       | -0.24    | 0.04     | 0.249%          | 1.64               |
|                                      |                     | 49.98          | 99.96       | -0.04    | 0.11     | 4.99 mg         | 2.45               |
|                                      |                     | 100.70         | 100.70      | 0.70     | 0.02     | 5.04 mg         | 1.63               |
| Tussilate syrup (SDI)                | 5 mg of PPh/mL      | 299.27         | 99.76       | -0.24    | 0.14     | 4.99 mg         | 1.01               |
|                                      |                     | 49.92          | 99.84       | -0.16    | 0.04     | 4.99 mg         | 1.64               |
|                                      |                     | 99.98          | 99.98       | -0.02    | 0.05     | 4.99 mg         | 0.99               |
| Achee Syrup (India)                  | 5 mg of PPh/mL      | 299.91         | 99.97       | -0.03    | 0.01     | 4.99 mg         | 2.45               |

\* Average of five estimations, <sup>a</sup> t-exp.: t-experimental, <sup>a</sup>  $t \pm = (\bar{x} - \mu) \frac{\sqrt{N}}{s}$

Table 5. Analysis of phenylephrine hydrochloride in pharmaceutical preparations by standard additions method

| pharmaceutical preparations                      | PPh found (µg) | PPh found (µg) | Recovery (%) | Relative error (%) |
|--------------------------------------------------|----------------|----------------|--------------|--------------------|
| Phenylephrine.HCl injection 500 µg /10mL(France) | 50             | 49.67          | 99.34        | -0.66              |
|                                                  | 100            | 101.92         | 101.92       | 1.92               |
| Nasofen drop (1.0%) (Pioneer)                    | 50             | 49.61          | - 99.2       | -0.78              |
|                                                  | 100            | 102.07         | 102.07       | 2.07               |
| Nasophrine drop (0.25%) (SDI)                    | 50             | 50.07          | 100.14       | 0.14               |
|                                                  | 100            | 101.76         | 101.76       | 1.76               |
| Tussilate syrup 5 mg/mL (SDI)                    | 50             | 50.23          | 100.46       | 0.66               |
|                                                  | 100            | 101.6          | 101.6        | 1.60               |
| Achee Syrup 5 mg/mL (India)                      | 50             | 50.38          | 100.76       | 0.76               |
|                                                  | 100            | 101.69         | 101.69       | 1.69               |

### Comparison with other methods

Table 5 shows the comparison between some of analytical variables for the suggested method with that of another

literature spectrophotometric method, which utilized the same procedure (forming color azo-dye).

Table 5. Comparison of the method

| Analytical variables                        | Method 1                | Method 2              | Method 3                 | Current method                    |
|---------------------------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Reagent                                     | Clonazepam              | 2,4-DNA               | MCP. HCl                 | Sulphanilic acid                  |
| Wavelength (nm)                             | 466                     | 455                   | 470                      | 441                               |
| Linear range (µg/mL)                        | 0.5-9.0                 | 1.0-20                | 10-32                    | .2-200                            |
| εmax , (l/mol.cm)                           | 2.5457x10 <sup>4</sup>  | 1.915x10 <sup>4</sup> | 9.51x10 <sup>3</sup>     | 8.513x10 <sup>3</sup>             |
| Sandell's sensitivity (µg/cm <sup>2</sup> ) | 0.01                    | 0.012                 | 0.0214                   | 0.0239                            |
| Application                                 | Nasal drop              | Nose drop and syrup   | Nasal drop               | Injection<br>Nose drops<br>Syrups |
| References                                  | Alteemi and Kadim, 2020 | Hasan et al., 2020    | Al-Abachi and Abed, 2015 | Proposed method                   |

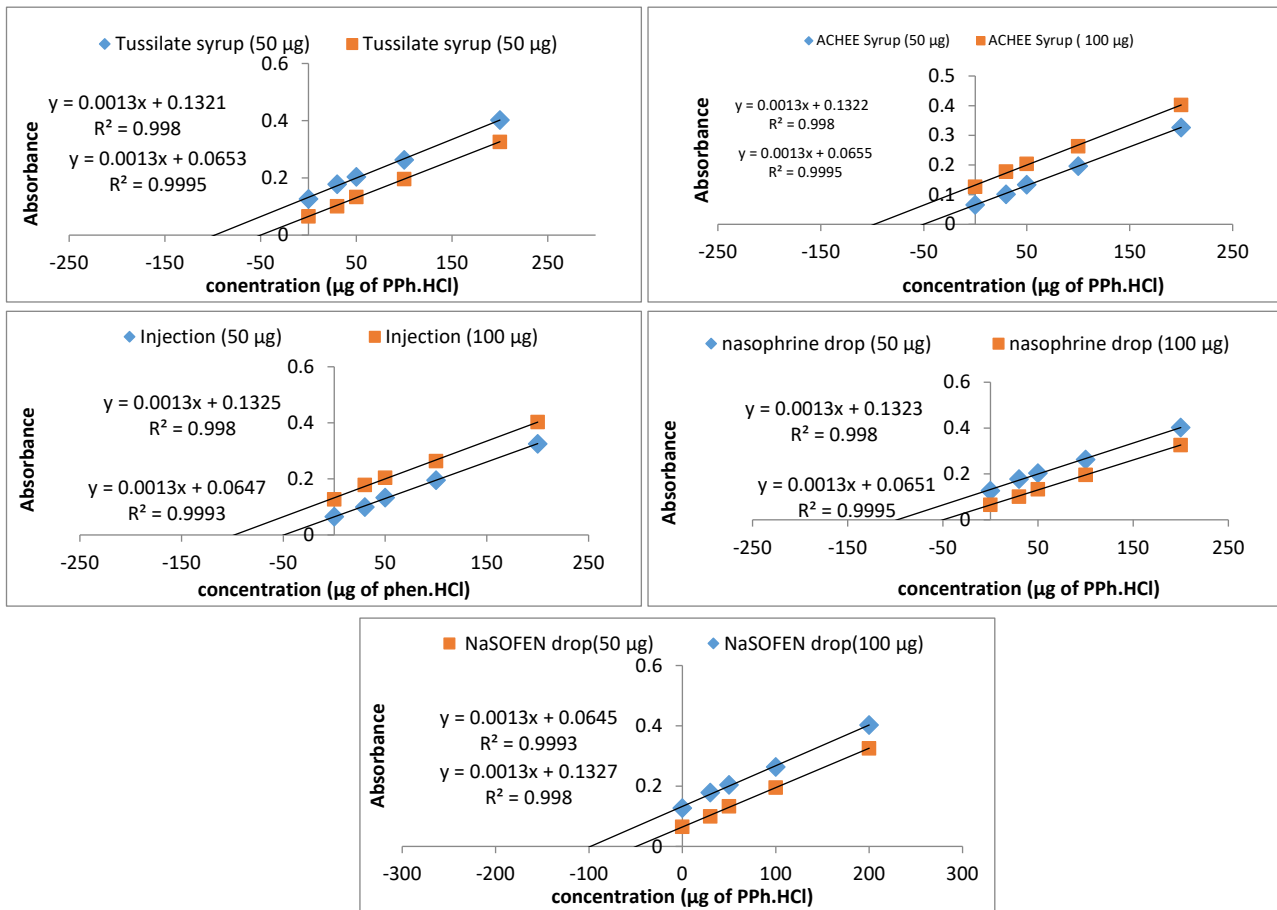


Figure 6. Calibration graphs of standard additions method for the estimation of PPh in the pharmaceutical preparations

#### 4. CONCLUSION

This work describes a simple and sensitive spectrophotometric method for the estimation of PPh in its pure form and in certain drugs through diazotization and coupling reaction. The method does not require solvent extraction steps or temperature control. The method is also precise and accurate to be successfully applied for estimating PPh in injection, nose drops and syrups.

#### REFERENCES

- Ahmed, A. Kh.; Anwar, S.M.; Hattab, A.H. (2020). Spectrophotometric Determination of Phenylephrine Hydrochloride in Pharmaceutical Preparations by Oxidative Coupling Reaction, *IJDDT*, 10(3), 323-327. <https://doi.org/10.25258/ijddt.10.3.2>
- Ahmed, H. H., & Mohammed, S. A. (2023). Spectrophotometric Estimation of Phenylephrine Hydrochloride via Oxidative Coupling Reaction with p-Aminobenzophenone. *Biomedicine and Chemical Sciences*, 2(2), 83-89. <https://doi.org/10.48112/bcs.v2i2.455>
- Ahmed, I. S.; Amin, A. S. (2007). Spectrophotometric micro determination of phenylephrine hydrochloride in pure and in pharmaceutical formulations using haematoxylin. *Journal of Molecular Liquids*, 130, 84-87. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2006.04.011>
- Al-Abachi, M.Q.; Abed, S. S. (2015). Flow injection-Spectrophotometric Determination of Phenylephrine Hydrochloride and Amoxicillin Trihydrate in Pharmaceutical Preparations, *Journal of Al-Nahrain University Science*, 16(1), 42-52. <https://mail.anjs.edu.iq/index.php/anjs/article/view/711/637>
- Al-Abachi, M.Q. and Abed, S.S. (2015). Spectrophotometric Determination of Phenylephrine hydrochloride and Salbutamol sulphate drugs in pharmaceutical preparations using diazotized Metoclopramide hydrochloride, *Baghdad Science Journal*, 12(1), 167-177. <https://doi.org/10.21123/bsj.2015.12.1.167-177>
- Aljeboree, A. M.; Alshirifi, A. B. (2018). Colorimetric Determination of phenylephrine hydrochloride drug Using 4-Aminoantipy-rine: Stability and higher sensitivity, *J. Pharm. Sci. & Res.*, 10(7), 1774-1779. <https://www.jpsr.pharmainfo.in>
- Aljeboree, A.M.; Alshirifi, A.N. (2019). Determination of phenylephrine hydrochloride and amoxicillin in a binary mixture using derivative spectrophotometry methods. *IJPQA*, 10 (3): 168-177. <https://doi.org/10.25258/ijpqa.10.3.10>
- Al-Shaalan, N.H. (2010). Determination of phenylephrine hydrochloride and chlorpheniramine maleate in binary mixture using chemometric-assisted spectrophotometric and high-performance liquid chromatographic-UV methods, *Journal of Saudi Chemical Society*, 14, 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2009.12.004>
- Alteemi, H.S. and Kadim, K.H. (2020). Colorimetric Determination of Phenylephrine hydrochloride Drug by Diazotization Reaction, *Journal of Physics: Conference*



- Series, 1664(1), 012097. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1664/1/012097>
- Azeez, D.T.; Mohammed, S.A. (2022). Development of Spectrophotometric Method to Assay Sulfadiazine in Pure and in Pharmaceutical Dosage form through Diazotization and Coupling Reaction. *Jou. Raf. Sci.*, 31(1), 23- 34. <https://doi.org/10.33899/rjs.2022.172925>
- Battu, S.; Gandu, V.; Nenavathu, B.P. (2018). Simple spectrophotometric method for estimation of drugs using chloramine-T and indigo carmine dye couple, *Asian J Biomed Pharmacies Sci*, 10 (69), 19-24. <https://doi.org/10.35841/2249-622X.69.6498>
- British Pharmacopoeia (2022). H.M. Stationary Office, London.
- Gary, C. (2004). *Analytical Chemistry*. John Wiley and Sons, 6th ed., Philadelphia, pp. 90-97. <https://chemistrydocs.com/analytical-chemistry-by-g-d-christian/>
- Delevic, R. (1997). *Principles of Quantitative Chemical Analysis*. Mc, Graw-Hill, International ed., Singapore, pp. 495-502. <https://www.amazon.com/Principles-Quantitative-Chemical-Analysis-Robert/dp/0070163626>
- Hargis, L.G. (1988). Analytical chemistry: principle and techniques. Printic Hall International, London pp. 424-427.
- Hasan, S.H.; Othman, N.S.; Surchi, K.M.(2016). Determination of Phenylephrine-HCl Using Conductometric Titration Method. *Current Analytical Chemistry*, 12(4): 330 – 334. <https://doi.org/10.2174/1573412912666151126205443>
- Hasan, Sh. H.; Othman N.S.; Surchi, K. M.(2020). Using of Diazotized 2,4-Dinitroaniline in Spectrophotometric Estimation of Phenylephrine Hydrochloride, *Rafidain Journal of Science*, 29(3): 73-64. <http://dx.doi.org/10.33899/rjs.2020.166310>
- Ibraheem, A.K. (2009). Spectrophotometric Assay of phenylephrine hydrochloride Via coupling with Diazotised p-Nitroaniline, Application to Pharmaceutical Preparation, *Tikrit Journal of Pharmaceutical Sciences*, 5(2), 182-191. <https://www.iasj.net>
- International Conference on Harmonization (2005). ICH Harmonized Tripartite Guide-line: Validation of Analytical Procedures Text and Methodology, Q2 (R1), Current Step 4 Version, pp. 11-13.
- Mzban, Q.; Bahja, S.; Hassan, M.J.M. (2020). Dispersive liquid-liquid microextraction and spectrophotometric Determination of cefazone and phenylephrine hydrochloride in their pure forms and pharmaceutical preparations, *Plant Archives*, 20(2), 6771-6777. [http://www.plantarchives.org/20-2/6771-6777%20\(6664\).pdf](http://www.plantarchives.org/20-2/6771-6777%20(6664).pdf)
- Nagarjuna, P.J; Kumar, B.T.; Nalluri, B.N. (2020) Simultaneous Analysis of Phenylephrine HCl and Ketorolac Tromethamine in Bulk and Injectable Formulations by RP-HPLC-PDA Method, *Journal of Drug Delivery and Therapeutics* 10(4s), 39-45. <https://doi.org/10.22270/jddt.v10i4-s.4204>
- Nejres, A. M., & Najem, M. A. (2022). Use of Mesalazine for the Determination of Dopamine and Its Pharmaceutical Preparations by Spectrophotometric Method. *Israa Univ. J. Appl. Sci*, 6(1), 228-245. <https://doi.org/10.52865/AVWR7365>
- Othman, N.S.; Abdul Fatah, N. Th. (2009). Spectrophotometric Determination of Phenylephrine Hydrochloride by Coupling with Diazotized 2-Aminobenzothiazole, *Jou. Raf. Sci.*, 20(4), 69-81. <http://dx.doi.org/10.33899/rjs.2009.39971>
- Radhia, N. D.; Alshamusi, Q.K.M.; Sahib, I.J.; Jaism, L.S.; Aljeboree, A.M. (2021). Oxidative coupling of phenylephrine hydrochloride using N,N-dimethyl-p-phenylenediamine: Stability and higher sensitivity, 3rd International Scientific Conference of Alkafeel University, 030026-1. <https://doi.org/10.1063/5.0066984>
- Ragab, M.A.A.; Abdel-Hay, M.H.; Ahmed, H.M.; Mohyeldin, S.M. (2019). Determination of Ibuprofen and Phenylephrine in Tablets by High-Performance Thin Layer Chromatography and in Plasma by High-Performance Liquid Chromatography with Diode Array Detection, *Journal of Chromatographic Science*, 57(7), 592–599. <https://doi.org/10.1093/chromsci/bmz031>
- Suratiya S.; Pancholi, S.S. (2014). Development and validation of dual-wavelength method for Simultaneous Estimation of Ebastine and Phenylephrine hydrochloride in Bulk and Pharmaceutical Dosage Form. *International Journal of Pharmamedix India*, 2(3):781–791.
- The United states Pharmacopoeia (2008). USP 32 NF 27, by Roydan, USA, p.3284. [https://www.uspnf.com/sites/default/files/usp\\_pdf/EN/USPNF/USP32-NF27SecondSupplementRevisionCommentary.pdf](https://www.uspnf.com/sites/default/files/usp_pdf/EN/USPNF/USP32-NF27SecondSupplementRevisionCommentary.pdf)
- Wasan A. Al-Uzri (2019). Determination of phenylephrene hydrochloride in pharmaceutical preparations using spectrophotometric method, *Asian J Pharm Clin Res*, 12(5), 339-343. <https://doi.org/10.22159/ajpcr.2019.v12i5.32339>
- Yagmur, S.; Ture, M.; Saglikoglu, G.; Sadikoglu, M.; Yilmaz, S.(2018). The Quantitative Detection of Phenylephrine in Pharmaceutical Preparations and Spiked Human Urine by Voltammetry, *Russian Journal of Electrochemistry*, 54, 741–746. <https://doi.org/10.1134/S1023193518100063>
- Zakaria, S. A. (2021). Simple spectrophotometric method for Determination of phenylephrine hydrochloride in pure and pharmaceutical forms, *Iraqi National Journal of Chemistry*, 21(1), 19-29.

## BIOGRAPHYES





**Hanan, H., Ahmed,** Mini Date  
of Birth: October 1974  
B.sc: 1996  
M.sc: 24/1/1999  
Working as a Lecture in Scientific  
College since 7/3/1999  
Publications: 7



**Salim, A., Mohammed,** Date of  
Birth: July 1, 1956  
M.Sc. :17/9/1986  
Ph.D.: 8/4/1996  
Professor of analytical  
Chemistry : 30/4/2012  
no. of Publications: 41

# Uso de un Catalizador Regenerado de la Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado para el Reciclaje Químico mediante Glicólisis del Poli-(Tereftalato de Etileno)

Naranjo, Juan<sup>1,\*</sup> ; Palmay, Paul<sup>1</sup> ; Jaramillo, Kerly<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba, Ecuador

**Resumen:** La alta demanda de materiales plásticos ha sido una tendencia post Covid-19 debido a la necesidad de materiales de protección y empaquetado para productos sanitarios y alimentarios. Sin embargo, esta situación ha agravado la problemática medioambiental asociada a la contaminación por residuos plásticos, debido a su largo tiempo de vida, por lo que en los últimos años se ha intensificado la búsqueda de alternativas de su reciclaje. De igual manera, la disposición final de los catalizadores utilizados en la petroquímica representa un importante desafío, puesto que estos terminan en vertederos, siendo un gran foco de contención por su alto contenido de metales pesados. Con este enfoque, el presente estudio tiene como objetivo la evaluación del uso de catalizadores regenerados FCC provenientes de procesos petroquímicos y su aplicación en el proceso de despolimerización mediante glicólisis del poli-(tereftalato de etileno). El catalizador fue regenerado mediante tratamiento térmico y químico, el mismo que posterior a su análisis fue evaluado en el proceso de glicólisis en cantidades del uno y dos por ciento en masa, comparándolo con otros catalizadores convencionales como el acetato de zinc y la zeolita ZSM-5 en la obtención de bis-hidroxi etilen tereftalato (BHET). Los resultados mostraron un rendimiento muy significativo comparado con los otros catalizadores, así también se demostró que la cantidad de catalizador no presenta influencia significativa en el proceso de despolimerización. Resultados que se muestran como una opción prometedora para combatir la problemática de la aglomeración de materiales plásticos.

**Palabras clave:** Reciclaje químico, poli-(tereftalato de etileno) (PET), glicólisis, despolimerización, regeneración de catalizadores

## Use of a Regenerated Catalyst from Fluid Catalytic Cracking for the Poly- (Ethylene Terephthalate) Chemical Recycling via Glycolysis

**Abstract:** The high demand for plastic materials has been a post-Covid-19 trend due to the need for protective and packaging materials for sanitary and food products. However, this situation has exacerbated the environmental problem associated with plastic waste pollution, which has led to intensified efforts to find recycling alternatives in recent years. The final disposal of catalysts used in petrochemicals also represents a significant challenge, as they end up in landfills and are a major source of contamination due to their high heavy metal content. This study aims to evaluate the use of regenerated FCC catalysts from petrochemical processes in the depolymerization process of poly-(ethylene terephthalate) by glycolysis. The results showed that the regenerated catalyst had a significant performance compared to conventional catalysts such as zinc acetate and ZSM-5 zeolite in obtaining bis (hydroxyethyl terephthalate) (BHET), and the amount of catalyst did not significantly affect the depolymerization process. These results show a promising option for addressing the problem of plastic waste.

**Keywords:** Chemical recycling, poly-(ethylene terephthalate) (PET), glycolysis, depolymerization, catalyst regeneration

### 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los plásticos de un solo uso han tenido una creciente demanda debido a su versatilidad y

bajo costo, sin embargo una mayor producción conlleva una mayor generación de residuos, los cuales se han convertido en un punto trascendental desde el punto de vista ambiental en la agenda mundial, es así que, se estima que cada año al menos 8 millones de toneladas de

\*naranjosilvajuanantonio@gmail.com

Recibido: 23/07/2023

Aceptado: 04/10/2023

Publicado en línea: 09/02/2024

10.33333/tp.vol53n1.05

CC 4.0

residuos plásticos son vertidas a los océanos (Sheel & Pant, 2019), representando una amenaza para la vida marina y el medio ambiente en general. Además, el plástico presenta una naturaleza no biodegradable y es un material que tarda cientos de años en descomponerse, por lo que su acumulación puede tener consecuencias a largo plazo (Al-Sabagh et al., 2016). De este modo, es necesario tomar medidas y concientizar a los estados con el fin de reducir el uso de plásticos de un solo uso, fomentando de este modo la reutilización y el reciclaje, y así buscar alternativas más sostenibles (Sheel & Pant, 2019). En este sentido, la innovación y la investigación son fundamentales para desarrollar e invertir en nuevos materiales y tecnologías que permitan reducir la dependencia del plástico y mejorar la gestión de residuos plásticos (Bahramian, 2021).

A nivel global se han presentado varias iniciativas que se están llevando a cabo, que incluye la implementación de políticas públicas para reducir el consumo de plásticos, la promoción de la economía circular para fomentar la reutilización, y el desarrollo de materiales biodegradables y compostables que sean una alternativa al uso de materiales plásticos los cuales sean menos perjudiciales para el medio ambiente (Sheel & Pant, 2019). Organismos internacionales estimaron que en el año 2015 se generaron más de 6 300 millones de toneladas métricas de residuos plásticos en todo el mundo. Sin embargo, solo el 9 % de esos desechos fue reciclado, el 12 % fue sometido a incineración y el restante 79 % se encuentra acumulado en el medio ambiente (Wang et al., 2018).

De este modo, ante la problemática global generada por el uso excesivo y la gestión inadecuada de estos residuos, han surgido diversas estrategias de reciclaje para abordar este desafío (Sangalang et al., 2015). Una de las alternativas más alentadoras es el reciclaje químico, puesto que ofrece múltiples beneficios, entre ellos la posibilidad de reciclar plásticos de baja calidad que no pueden ser reciclados por métodos convencionales. Además, esta técnica permite la recuperación de compuestos de interés industrial similares a los producidos por petroquímica, reduciendo la dependencia de recursos naturales y la necesidad de producir nuevos plásticos (Al-Sabagh et al., 2016; Fuentes et al., 2020; Ramirez et al., 2010).

Esta técnica se basa en la despolimerización de las cadenas de politereftalato de etileno (PET) (Bahramian, 2021), mediante procesos químicos específicos que permiten su conversión en monómeros, dímeros y oligómeros, así como la producción de subproductos gaseosos (Bertolotti et al., 2005; Stoski et al., 2016), los mismos que pueden ser reutilizados mediante la repolimerización para obtener plásticos vírgenes (Bertolotti et al., 2005; Fuentes et al., 2020).

En la actualidad, esta problemática ha desatado nuevas formas de tratamiento de los desechos plásticos lo cual ha despertado el interés de la comunidad científica, siendo el reciclaje químico una alternativa para lidiar con

este inconveniente (Bertolotti et al., 2005; Raheem et al., 2019).

El uso de calor y la limitada presencia de oxígeno es el principio básico para los métodos convencionales de reciclaje químico como la pirólisis y la gasificación que descomponen el polímero sin que exista combustión en el proceso (Bhoi & Rahman, 2022). Además de estas, existen otros métodos que hacen uso de disolventes como es el caso de la glicólisis, la cual consiste en la despolimerización y rompimiento de las cadenas largas de PET por acción de un glicol, entre ellos se encuentra el etilenglicol, propilenglicol, trietilenglicol (Fuentes et al., 2020; Mendiburu-Valor et al., 2021). El etilenglicol es el disolvente más usado en la obtención de bis-tereftalato de hidroxietilo (BHET). Es importante mencionar que la conversión del dímero de BHET en monómeros de BHET es una reacción donde es necesaria la acción de catalizadores que actúen en la conversión de oligómeros a dímeros o monómeros (Esquer & García, 2019). La glicólisis catalítica es aquella que presenta mayor selectividad hacia el BHET, cuya principal característica es el uso de catalizadores, con la finalidad de aumentar la tasa de conversión de PET a BHET (Esquer & García, 2019; Sheel & Pant, 2019), estos son esenciales para acelerar el proceso de transesterificación entre el etilenglicol y los grupos éster del PET, lo que permite obtener los monómeros de BHET de manera más eficiente. Es así como estudios cinéticos realizados con anterioridad han demostrado la efectividad de los catalizadores ya que por medio de estudios cinéticos, se determinó que la reacción sin el uso de catalizadores es extremadamente lenta, tomando hasta 8 horas para completarse. Así también, la energía de activación para esta reacción sin catalizador es alta con un valor de 32 kcal/mol, en contraste, cuando se utiliza un catalizador, la reacción ocurre mucho más rápido, y la energía de activación necesaria es menor, de 19 kcal/mol (Sangalang et al., 2015).

Los catalizadores presentan una alta actividad debido a su área superficial, porosidad y resistencia térmica, lo que es fundamental para favorecer la interacción entre reactantes y sitios activos, mejorando así la eficiencia del proceso de reacción, asimismo, estos poseen una distribución uniforme y controlable del tamaño de poro (Che et al., 2019; Han et al., 2021; Wang et al., 2018; Zhao et al., 2015; Zheng et al., 2017).

Con este principio, la industria petroquímica hace el uso de catalizadores en el proceso de fluidización para mejorar la calidad de sus productos. Sin embargo, estos pierden su actividad debido al envenenamiento por metales pesados que se adhieren a su superficie. Por lo tanto, es necesario regenerarlos (Fuentes et al., 2020; Gonzalez et al., 2015; Sánchez, 2018). La neutralización de los sitios ácidos producto del envenenamiento disminuye el rendimiento de nafta aumentando así la producción de coque (Berenguer et al., 2006; Sánchez, 2018). En la actualidad, las limitaciones inherentes al método de regeneración opacan la capacidad de ser reutilizados en repetidas ocasiones, lo que implica que

haya un término definido en su vida útil (Amiri et al., 2011; Sánchez, 2018).

La inadecuada disposición final de los catalizadores usados en procesos petroquímicos como el cracking catalítico fluidizado (FCC) al finalizar su vida útil, es una importante fuente de contaminación ambiental debido a la presencia de elementos en su composición como metales pesados y otros compuestos nocivos (Amiri et al., 2011). Por lo tanto, se hace necesario establecer un tratamiento final definitivo para minimizar los impactos negativos asociados con estos catalizadores y prevenir efectos perjudiciales sobre el medio ambiente y la salud pública. Partiendo de esta premisa, se ha llevado a cabo una investigación para regenerar y caracterizar al catalizador agotado de la unidad FCC de la refinería de Esmeraldas ubicada en la provincia de Esmeraldas Ecuador, mediante tratamientos térmicos y químicos.

El objetivo del presente trabajo fue la utilización de catalizador FCC agotado en despolimerización de PET mediante glicólisis catalítica con el fin de determinar su acción catalítica al ser regenerado y determinar el rendimiento de la reacción variando la relación de catalizador/plástico, para lo propuesto se comparó con catalizadores previamente estudiados: el catalizador comercial ZSM-5 realizada por Zheng et al. (2017) y el acetato de zinc por Alvarado (2021).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Diseño experimental

En este estudio, se llevó a cabo el diseño experimental presentado en la Figura 1, el cual tenía como objetivo determinar el efecto de la variación de la cantidad de tres catalizadores en la glicólisis de PET.

Se ejecutaron 18 experimentos, 6 para cada uno de los catalizadores. En cada conjunto de experimentos, se modificó la cantidad de catalizador en 1 % y 2 % en masa del PET utilizado.

La experimentación para cada cantidad y tipo de catalizador se realizó por triplicado para garantizar la confiabilidad de los datos.

A partir de los resultados obtenidos, se calculó el promedio porcentual para evaluar la eficacia de la cantidad y tipo de catalizador empleado en términos del porcentaje de BHET obtenido. Los datos recopilados se analizaron a través de pruebas estadísticas con el propósito de determinar si se presentaron diferencias significativas entre los resultados obtenidos utilizando los diversos catalizadores y cantidades de catalizador

### 2.2 Metodología de regeneración

El catalizador agotado FCC se muestreó de forma completamente aleatoria, y se almacenó mediante la metodología presentada por Andrade (2020) y Palmay (2022b), la cual constituye dos procesos que a continuación se detallan.

### 2.2.1 Tratamiento químico

Consistió en adicionar 200 mL de etanol al 99,9 % v/v con 20 g de catalizador agotado y verterlos en un matraz erlenmeyer de 500 mL. Esta mezcla se agitó con ayuda de un agitador magnético durante un período de 12 horas a 300 revoluciones por minuto. Luego de este tiempo, se filtró la mezcla con ayuda de una bomba de vacío y se dejó secar por al menos 24 horas a una temperatura de 120 °C.

### 2.2.2 Tratamiento térmico

En este tratamiento se procedió a trasvasar el catalizador previamente tratado químicamente en un crisol de 50 mL, el mismo que fue introducido en la mufla y por medio de rampas horarias, se llevó al catalizador de 100 a 350 °C con rampas de 50 °C/h, teniendo en cuenta que se mantuvo una hora a la temperatura final para proceder con la siguiente rampa que fue de 25 °C/h hasta lograr los 450 °C y del mismo modo que la primera se realizó la tercera rampa hasta llegar a 700 °C, la misma técnica fue realizada en la mufla Thermolyne modelo f48010-33, finalmente se dejó enfriar la muestra a temperatura ambiente.

## 2.3 Caracterización del catalizador

Uno de los indicadores de actividad catalítica es la acidez (Wang et al., 2018), misma que fue medida por medio de técnicas de desorción de amoníaco, ya que es un indicador clave de la cantidad de centros activos que contiene un catalizador, proceso en el cual la muestra fue desgasificada a 90 °C durante una hora. Posterior a esto, se introdujo en el vial de análisis 0,3 g de muestra y en corriente de He, 25 mL/min, se esperó hasta que se estabilice la señal del detector y se inyectó a 25 °C, 10 mL de amoníaco, al estabilizarse la señal, se elevó la temperatura a 400 °C con rampas de 10 °C/min, obteniendo así el volumen de amoníaco en desorción y se comparó con la curva de calibración existente, en el equipo Micromeritics AutoChem 2920

### 2.4 Glicólisis

Para cada prueba se alimentó 4 g de PET previamente extruido, se añadió 3 mL de etilenglicol y se adicionó el catalizador (1 y 2 % m/m). A continuación, se realizó un calentamiento progresivo hasta alcanzar una temperatura de 190 °C manteniendo agitación continua a revoluciones bajas por dos horas. La cera obtenida se disuelve con agua caliente y agitación durante 30 minutos, luego se filtró la dilución, la torta de filtrado obtenida se enfrió a 4 °C, esto con la finalidad de obtener cristales de BHET y eliminar totalmente el agua, a continuación, se procedió a secar en una estufa por un lapso de 24 horas a 50 °C, el producto obtenido se recoge y se pesa, según la metodología propuesta por Palmay (2022a) y Zhang et al. (2022).

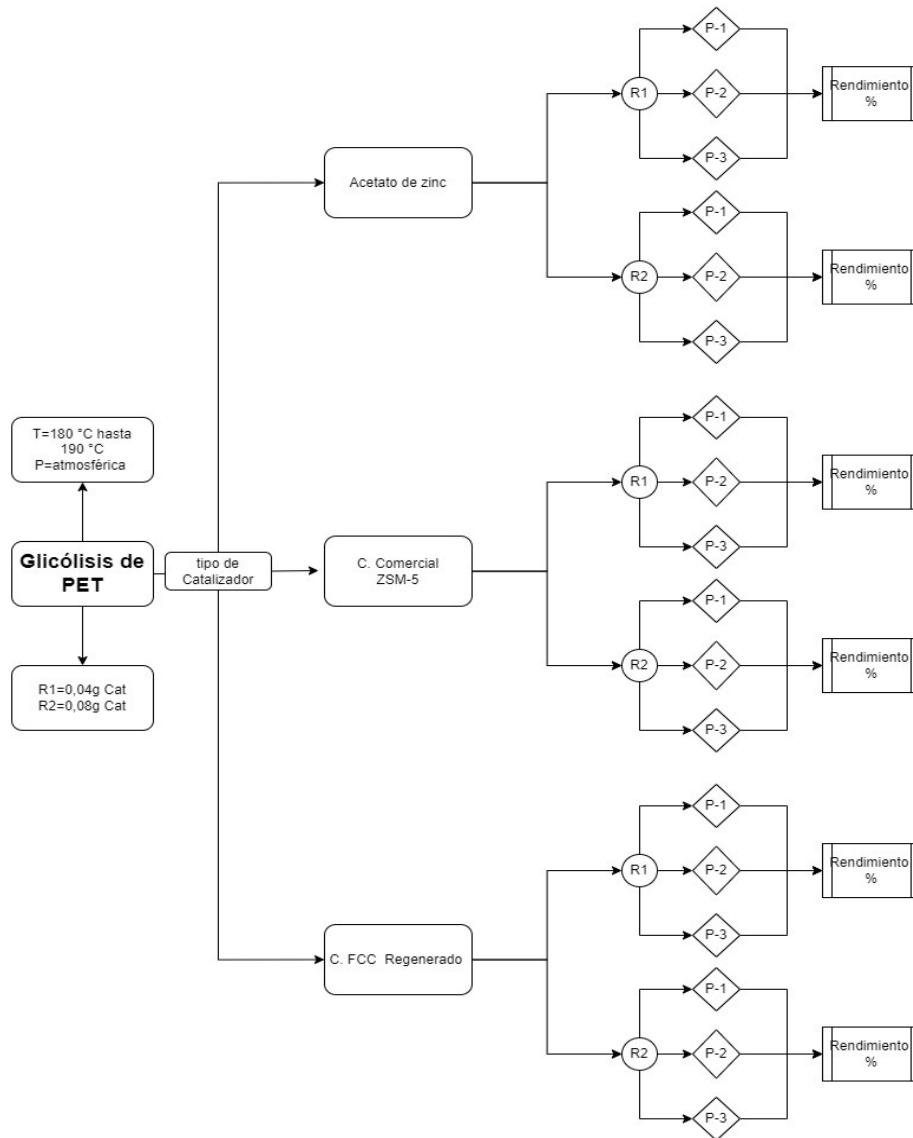


Figura 1. Diseño experimental

### 2.5 Rendimiento

El rendimiento de la reacción se determinó pesando la cantidad de PET inicial alimentado al reactor, y la cantidad de BHET producido al final de la reacción para lo cual se usó la Ecuación 1:

$$B(\%) = \frac{(W_{BHET})}{(W_0 PET)} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

W BHET = cantidad de BHET producido (g)  
 W 0 PET = cantidad de PET inicial (g)

### 2.6 Caracterización FTIR del BHET

Para determinar los principales grupos funcionales característicos presentes en el BHET, las 18 muestras glicolizadas fueron pulverizadas con ayuda de un mortero con el fin de obtener partículas con un tamaño de 60 µm, para su análisis mediante espectrofotometría infrarroja, por medio del espectrofotómetro de infrarrojo FTIR 4 100 de la marca Jasco, cuyo rango de medición

del número de onda es de 7 800 a 350 cm<sup>-1</sup>, resolución máxima de 0,7 cm<sup>-1</sup>.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Área superficial

La Figura 2 evidencia que la superficie del catalizador regenerado presenta gran porosidad, lo que establece que existe una mayor área superficial y por ende aumenta la superficie de contacto entre la superficie del catalizador con las moléculas de PET. Además, se observó que la morfología de la muestra analizada presenta una estructura variable en cuanto a su tamaño.

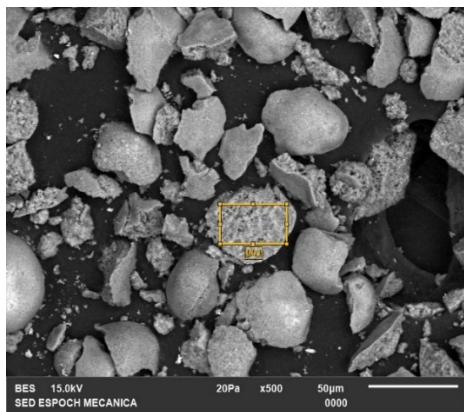


Figura 2. Microscopía SEM Cat. Regenerado  
Fuente: (Palmay, 2022b)

El análisis de composición EDS permitió determinar que el catalizador regenerado tiene un alto contenido de aluminio y silicio, y su relación es cercana a 1 esto es muy característico en catalizadores agotados. Según Palmay (2022b), la cantidad de los componentes principales del catalizador no ha sufrido cambios importantes, además evaluó el nivel de regeneración del catalizador al comparar la relación Si/Al del catalizador recuperado con los resultados obtenidos de la relación Si/Al para catalizadores nuevos (Kassargy et al., 2017). Este fenómeno se debe a que el etanol presenta una alta capacidad solvente de los contaminantes del catalizador, sin alterar el soporte del catalizador, como se observa en la Tabla 1 y Figura 3.

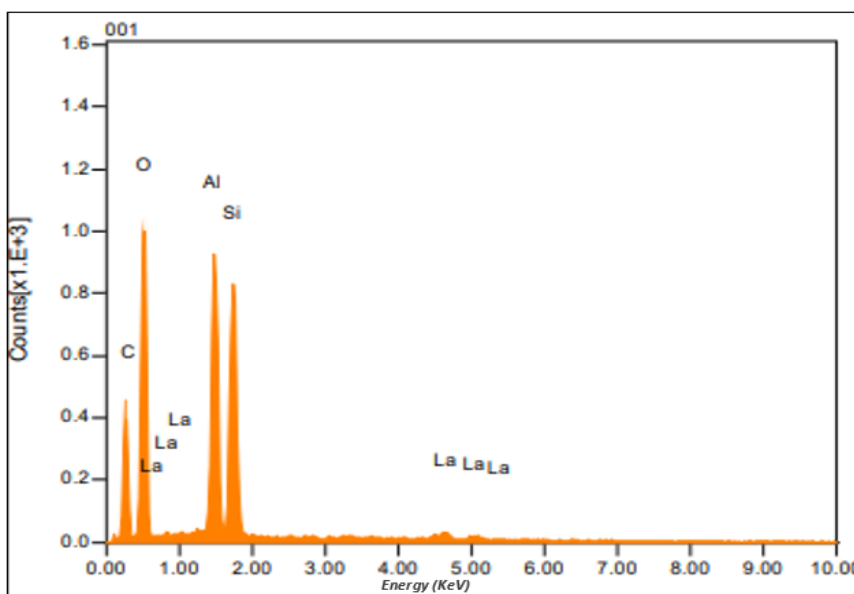


Figura 3. Imagen EDS Cat. Regenerado

Tabla 1. Composición del catalizador regenerado

| Componente    | (%)    |
|---------------|--------|
| Aluminio (Al) | 20,550 |
| Hierro (Fe)   | 0,570  |
| Silicio (Si)  | 19,540 |
| Lantano (La)  | 3,110  |
| Si-Al         | 0,951  |

### 3.2 Caracterización del catalizador

Los datos obtenidos de acidez, mediante desorción de amoníaco en el equipo Micromeritics AutoChem 2 920, se muestran en la Tabla 2, en la cual se pudo observar que la tasa de desorción de amoníaco del catalizador comercial es mayor que la del catalizador regenerado. Esto sugiere que el catalizador comercial cuenta con una mayor cantidad de sitios activos, lo que implica que es más ácido que el catalizador regenerado

Se ha demostrado que la acidez juega un papel importante en la actividad de los catalizadores, ya que los centros activos en la estructura del catalizador son

esenciales para romper los enlaces del polímero, puesto que, disminuyen el tiempo y temperatura de reacción (Esquer & García, 2019; Wang et al., 2021).

Tabla 2. Cantidad de desorción de amoníaco

| Muestra | Masa (g) | Temperatura (°C) | Valor (cm <sup>3</sup> /g) |
|---------|----------|------------------|----------------------------|
| CC      | 0,3691   | 200,0            | 253,78                     |
| Reg     | 0,3657   | 87,2             | 32,02                      |

El volumen es calculado en condiciones normales: 1 atm y 273 K

Para lo cual es importante trabajar con zeolitas protonadas o con puntos ácidos y evitar el uso de zeolitas sódicas que presentan una disminución significativa de la

acidez y, por lo tanto, una temperatura de degradación progresivamente más alta (Coelho et al, 2012).

3.3 Rendimientos

En la Tabla 3, se pueden visualizar los rendimientos de cada uno de los experimentos realizados con los diferentes tipos y cantidades de catalizador y en la Figura 4 se evidencia el histograma de medias porcentuales del rendimiento del catalizador.

Tabla 3. Rendimiento de los catalizadores

| Acetato de zinc        |        |       |       |        |       |       |
|------------------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| Catalizador            | 0,04 g |       |       | 0,08 g |       |       |
| Pruebas                | 1      | 2     | 3     | 1      | 2     | 3     |
| Cant. Catalizador (g)  | 0,045  | 0,042 | 0,044 | 0,084  | 0,080 | 0,081 |
| Cant. PET (g)          | 4,021  | 4,022 | 4,027 | 4,057  | 4,084 | 4,057 |
| Cant. BHET (g)         | 3,321  | 3,414 | 3,356 | 3,416  | 3,398 | 3,578 |
| Rendimiento (%)        | 82,59  | 84,88 | 83,34 | 84,20  | 83,20 | 88,19 |
| Media porcentual (%)   | 83,60  |       |       | 85,20  |       |       |
| Catalizador regenerado |        |       |       |        |       |       |
| Catalizador            | 0,04 g |       |       | 0,08 g |       |       |
| Pruebas                | 1      | 2     | 3     | 1      | 2     | 3     |
| Cant. Catalizador (g)  | 0,042  | 0,042 | 0,044 | 0,084  | 0,082 | 0,081 |
| Cant. PET (g)          | 4,011  | 4,005 | 4,02  | 4,014  | 4,030 | 4,210 |
| Cant. BHET (g)         | 3,012  | 3,105 | 3,102 | 3,021  | 3,118 | 3,207 |
| Rendimiento (%)        | 75,09  | 77,53 | 77,16 | 75,26  | 77,37 | 76,17 |
| Media porcentual (%)   | 76,59  |       |       | 76,26  |       |       |
| Catalizador comercial  |        |       |       |        |       |       |
| Catalizador            | 0,04 g |       |       | 0,08 g |       |       |
| Pruebas                | 1      | 2     | 3     | 1      | 2     | 3     |
| Cant. Catalizador (g)  | 0,043  | 0,041 | 0,046 | 0,087  | 0,081 | 0,082 |
| Cant. PET (g)          | 4,060  | 4,073 | 4,045 | 4,046  | 4,004 | 4,017 |
| Cant. BHET(g)          | 3,384  | 3,257 | 3,192 | 3,365  | 3,298 | 3,425 |
| Rendimiento (%)        | 83,35  | 79,96 | 78,91 | 83,17  | 82,36 | 85,26 |
| Media porcentual (%)   | 80,74  |       |       | 83,59  |       |       |

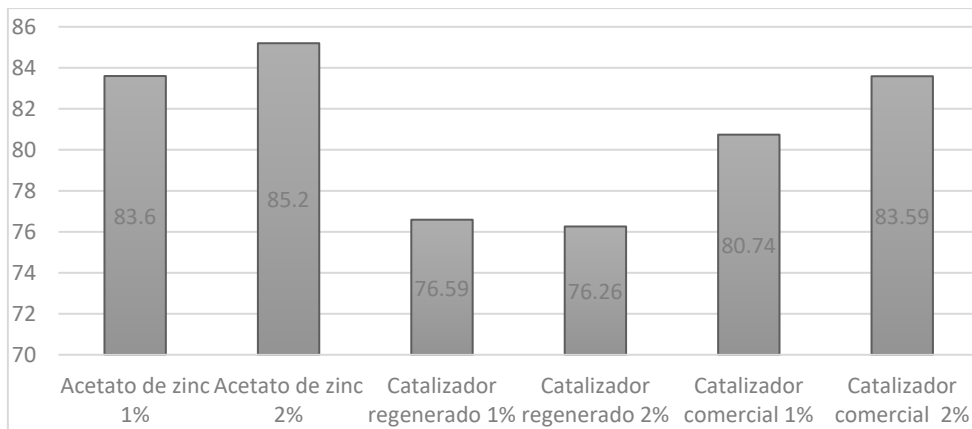


Figura 4. Histograma de medias porcentuales de rendimiento del catalizador en despolimerización de PET

De acuerdo a lo que se presenta en la Figura 4 y al análisis de varianzas de los rendimientos obtenidos en la experimentación se tiene que el catalizador regenerado presenta un rendimiento del 76% aproximadamente y que

la cantidad de catalizador estadísticamente no afecta en el porcentaje de producto obtenido. Este rendimiento del catalizador regenerado se atribuye que al ser un catalizador ya agotado y con un re procesamiento pierde



los puntos ácidos de su estructura en el procesamiento para su regeneración dificultando el craqueo de las moléculas. Sin embargo, estos rendimientos son alentadores ya que se está orientando a la economía circular alrededor de estos catalizadores.

Se comparó el rendimiento de cada catalizador, obteniendo como resultado que el acetato de zinc tiene el rendimiento más alto en cuanto a la reacción de despolimerización del PET.

Al-Sabagh et al. (2014) y Sheel & Pant (2019), mencionan en sus investigaciones que, los acetatos metálicos constituyen el grupo más activo para la reacción debido a su baja energía de ionización para la activación de los grupos carbonilo, permitiendo la inserción del etilenglicol y por ende la ruptura del polímero, siguiendo el orden  $Zn^{+2} > Mn^{+2} > Co^{+2} > Pb^{+2}$  en cuanto a la eficiencia como catalizador.

Además, Wang et al. (2021) indican que el uso de zeolitas como catalizador es adecuado y sustentable con el medio ambiente, ya que los catalizadores de metales pesados son muy contaminantes.

Con base en los resultados obtenidos, se determinó que la acción catalítica y el rendimiento son mejores en los acetatos metálicos, debido a la capacidad del metal para atacar el grupo carbonilo del polímero. Sin embargo, es importante mencionar que los catalizadores no logran una regeneración completa, lo que disminuye su actividad. Esto se debe a que, durante el proceso de regeneración, las partículas de catalizador pueden quedar entre los sitios intersticiales, lo que reduce el área superficial y, por lo tanto, la actividad catalítica, como se menciona en la investigación de Idriss & Barteau (2000).

### 3.4 Análisis estadístico

Tabla 5. Test de TUKEY

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC 95 %      | Valor T | Valor P ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------|---------|------------------|
| 2-1                   | 4,15                     | 1,54             | (-0.12;8,42) | 2,70    | 0,054            |

Nivel de confianza individual = 95,00 %

### 3.5 Espectroscopia FT-IR del producto glicolizado

La despolimerización con la acción de glicoles genera monómeros de BHET, el cual posee grupos funcionales inherentes que son más específicos en su huella dactilar, estos fueron identificados con ayuda de métodos de instrumentación, los espectros de cada una de las muestras se presentan en la Figura 5, donde se observa la presencia de grupos funcionales inherentes del BHET mismos que fueron interpretados por Shurvell (2006).

Se identificaron grupos hidroxilo  $OH^-$  en la banda de absorción en  $3\ 417,24\ cm^{-1}$ ; mientras que la presencia de grupos alquilo como  $CH_2$  y  $CH_3$  se evidencia en dos bandas de absorción en  $2\ 965,98\ cm^{-1}$  y  $2\ 884,99\ cm^{-1}$ .

Asimismo, se detectó el grupo carbonilo por la presencia de la banda de absorción en  $1\ 708,62\ cm^{-1}$ .

En el Software Minitab se obtuvo los datos estadísticos del test ANOVA que se muestra en la Tabla 4, así como simultáneamente se realizó el test de Tukey, con la finalidad de obtener los datos de la influencia que tiene la cantidad (A) y tipo del catalizador (B) en el rendimiento obtenido teniendo en cuenta el diseño experimental que se muestra en la Figura 3.

Tabla 4. Test ANOVA

| Fuente             | GL | Sc Ajust. | Mc. Ajust | Valor F | Valor P |
|--------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Modelado           | 5  | 219,053   | 43,811    | 14,00   | 0,000   |
| Lineal             | 3  | 211,374   | 70,458    | 22,52   | 0,000   |
| A (cantidad Cat)   | 1  | 8,515     | 8,515     | 2,72    | 0,125   |
| B (tipo Cat)       | 2  | 202,859   | 101,430   | 32,42   | 0,000   |
| Interacciones 2T   | 2  | 7,678     | 3,839     | 1,23    | 0,327   |
| A*B (cant. / tipo) | 2  | 7,678     | 3,839     | 1,23    | 0,327   |
| Error              | 12 | 37,540    | 3,128     |         |         |
| Total              | 17 | 25,592    |           |         |         |

Se realizaron tres comparativas: la interacción de cantidad de catalizador, tipo de catalizador y la interacción de tipo y cantidad del catalizador y se pudo evidenciar que el tipo de catalizador influye en el rendimiento de la reacción, ya que el nivel de significancia P es mucho menor a 0,05 descartando la hipótesis nula.

Al descartar la hipótesis se procedió a realizar el test de TUKEY, que se observa en la Tabla 5, con el fin de comparar los rendimientos del catalizador comercial y el catalizador regenerado, se puede observar que no existe variación significativa entre el uso de los 2 catalizadores

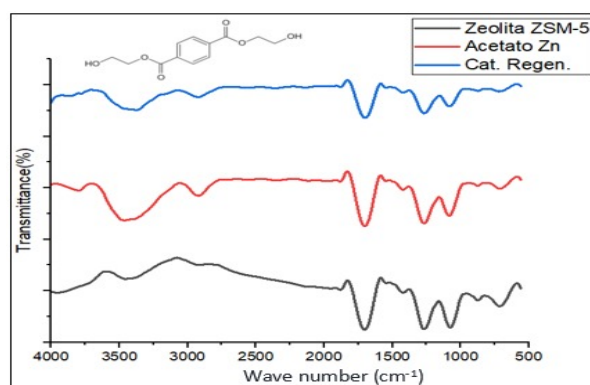


Figura 4. Espectro IR de BHET

Por otro lado, los enlaces carbono hidrógeno C-H son posibles de identificar por la presencia de las bandas de absorción  $1\ 407,78\ cm^{-1}$ ;  $1\ 342,21\ cm^{-1}$ ;  $1\ 454,06\ cm^{-1}$  y  $1\ 508,06\ cm^{-1}$ .

Además, se identificaron ésteres en la muestra por la banda de absorción en  $1\,257,36\text{ cm}^{-1}$ . Por último, las bandas de absorción en  $1\,018,23\text{ cm}^{-1}$  y  $1\,122,37\text{ cm}^{-1}$  indican la presencia de grupos éteres y alcoholes, mientras que la presencia de un anillo aromático fue detectada en la banda de absorción en  $721,25\text{ cm}^{-1}$ .

#### 4. CONCLUSIONES

Tras el análisis de los resultados obtenidos en el presente estudio de investigación, se ha demostrado que la glicólisis catalítica del PET tiene afinidad por catalizadores de baja selectividad, como es el caso del catalizador de fraccionamiento catalítico fluidizado (FCC).

En la reacción de despolimerización los resultados obtenidos son prometedores ya que presentan un rendimiento del 76 %, lo que sugiere que el catalizador en cuestión podría ser una alternativa viable para su uso en reciclaje químico.

Por otra parte, la regeneración del catalizador de la unidad de fraccionamiento catalítico fluidizado (FCC) es viable y podría proporcionar una solución sumamente rentable para la disposición final de los residuos de la petroquímica, solucionando problemas de carácter ambiental y económico, mientras que la glicólisis ofrece un valor agregado a los residuos plásticos que carecen de valor y que, al ser tratados con despolimerización, se convierten en materiales nuevamente utilizables en distintos tipos de industrias, siendo el BHET fundamental en la síntesis de diversos materiales poliméricos, que incluyen desde resinas de poliéster insaturadas y tereftalato de polietileno (PET) hasta la elaboración de sistemas biocompatibles novedosos (Xi et al., 2005).

También se ha demostrado que la cantidad del catalizador empleado no influye significativamente en los resultados, posiblemente debido a la irregularidad de su superficie y la limitación de sus sitios activos en comparación con los catalizadores de carácter comercial. Además, el uso de catalizadores no selectivos como el catalizador FCC en glicólisis, contribuye a reducir la dependencia de acetatos metálicos como catalizadores. Cabe destacar que el uso de metales como el plomo y el zinc son altamente selectivos pero sus iones son sumamente contaminantes, lo que hace que su uso no sea una opción viable para procesos químicos sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.

En consecuencia, los resultados de este estudio sugieren que el catalizador de la unidad de fraccionamiento catalítico fluidizado (FCC) podría ser una opción prometedora para la glicólisis catalítica del PET y su aplicación en el reciclaje de plásticos, lo que podría contribuir significativamente a la reducción de la contaminación ambiental y el avance hacia una economía circular más sostenible.

#### REFERENCIAS

- Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eissa, A. M. F., Moustafa, M. E., Eshaq, G., Rabie, A. M., & Elmetwally, A. E. (2014). Cu- and Zn-acetate-containing ionic liquids as catalysts for the glycolysis of poly(ethylene terephthalate). *Polymer Degradation and Stability*, *110*, 364–377. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.10.005>
- Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eshaq, G., Rabie, A. M., & Elmetwally, A. E. (2016). Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. *Egyptian Journal of Petroleum*, *25*(1), 53–64. <https://doi.org/10.1016/J.EJPE.2015.03.001>
- Alvarado, M. (2021). Determinación de la influencia del tipo de catalizador en el rendimiento de reacción de glucólisis de poli tereftalato de etileno (PET) post-consumo. [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba.]. Repositorio DSPACE Espoch. <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/16763>
- Amiri, F., Yaghmaei, S., Mousavi, S. M., & Sheibani, S. (2011). Recovery of metals from spent refinery hydrocracking catalyst using adapted *Aspergillus niger*. *Hydrometallurgy*, *109*(1–2), 65–71. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2011.05.008>
- Andrade Avila, L. (2020). *Regeneración de catalizadores agotados de la unidad de Cracking Catalítico Fluidizado (FCC) de refinería, para su utilización en pirólisis catalítica*. [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.]. Repositorio DSpace Espoch. <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/16707>
- Bahramian, A. (2021). Synergistic effects of gamma irradiation on the PET surface and heat treatment of hydrotalcite catalyst supported by Pt/TiO<sub>2</sub> nanoparticles on PET depolymerization rate. *Surface and Interface Analysis*, *53*(2), 215–229. <https://doi.org/10.1002/sia.6903>
- Berenguer, D., Marcilla, A., & Go, A. (2006). Study of the influence of the characteristics of different acid solids in the catalytic pyrolysis of different polymers. *Applied Catalysis A: General*, *301*(2), 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2005.12.018>
- Bertolotti, B., Rospigliosi, C., & Nakamatsu, J. (2005). Poliésteres y Reciclaje Químico del Poli(tereftalato de etileno). *Revista de Química*, *19*(1), 13–20. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/18726>
- Bhoi, P. R., & Rahman, M. H. (2022). Hydrocarbons recovery through catalytic pyrolysis of compostable and recyclable waste plastics using a novel desk-top staged reactor. *Environmental Technology & Innovation*, *27*, 102453. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2022.102453>
- Che, Q., Yang, M., Wang, X., Yang, Q., Rose Williams, L., Yang, H., Zou, J., Zeng, K., Zhu, Y., Chen, Y.,

- & Chen, H. (2019). Influence of physicochemical properties of metal modified ZSM-5 catalyst on benzene, toluene and xylene production from biomass catalytic pyrolysis. *Bioresource Technology*, 278, 248–254. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.01.081>
- Coelho, A., Costa, L., Marques, M. M., Fonseca, I. M., Lemos, M. A. N. D. A., & Lemos, F. (2012). The effect of ZSM-5 zeolite acidity on the catalytic degradation of high-density polyethylene using simultaneous DSC/TG analysis. *Applied Catalysis A: General*, 413–414, 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2011.11.010>
- Esquer, R., & García, J. J. (2019). Metal-catalysed Poly(Ethylene) terephthalate and polyurethane degradations by glycolysis. *Journal of Organometallic Chemistry*, 902, 120972. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2019.120972>
- Fuentes, C. A., Gallegos, M. V., García, J. R., Sambeth, J., & Peluso, M. A. (2020). Catalytic Glycolysis of Poly (ethylene terephthalate) Using Zinc and Cobalt Oxides Recycled from Spent Batteries. *Waste and Biomass Valorization*, 11(9), 4991–5001. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00807-6>
- Gonzalez, M. R., Pereyra, A. M., & Basaldella, E. I. (2015). Reconversión de catalizadores agotados de FCC para su uso en purificación de efluentes acuosos. *Investigación Joven*, 2(2), 86-87. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/51259>
- Han, Y., Yu, J., Chen, T., Liu, X., & Sun, L. (2021). Study on catalytic pyrolysis mechanism of natural rubber (NR) over Zn-modified ZSM5 catalysts. *Journal of the Energy Institute*, 94, 210–221. <https://doi.org/10.1016/J.JOEL.2020.09.005>
- Idriss, h., & barteau, m. (2000). Active Sites on Oxides: From Single Crystals to Catalysts. *Advances in Catalysis*, 45(M), 261–331. [https://doi.org/10.1016/s0360-0564\(02\)45015-8](https://doi.org/10.1016/s0360-0564(02)45015-8)
- Kassargy, C., Awad, S., Burnens, G., Kahine, K., & Tazerout, M. (2017). Experimental study of catalytic pyrolysis of polyethylene and polypropylene over USY zeolite and separation to gasoline and diesel-like fuels. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 127, 31–37. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2017.09.005>
- Mendiburu-Valor, E., Mondragon, G., González, N., Kortaberria, G., Eceiza, A., & Peña-Rodríguez, C. (2021). Improving the efficiency for the production of bis-(2-hydroxyethyl) terephthalate (BHET) from the glycolysis reaction of poly(ethylene terephthalate) (PET) in a pressure reactor. *Polymers*, 13(9), 1461. <https://doi.org/10.3390/polym13091461>
- Palmay, P., Alvarado, M & Sánchez, M. (2022a). Influencia del tipo de catalizador en el rendimiento de reacción de glucólisis de poli Tereftalato de etileno (pet) post consumo. *Perfiles*, 1(28), 6–13. <https://doi.org/10.47187/perf.v1i28.172>
- Palmay, P., Medina, C., Donoso, C., Barzallo, D., & Bruno, J. C. (2022b). Catalytic pyrolysis of recycled polypropylene using a regenerated FCC catalyst. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1, 7–11. <https://doi.org/10.1007/S10098-022-02453-4/FIGURES/7>
- Raheem, A. B., Noor, Z. Z., Hassan, A., Abd Hamid, M. K., Samsudin, S. A., & Sabeen, A. H. (2019). Current developments in chemical recycling of post-consumer polyethylene terephthalate wastes for new materials production: A review. *Journal of Cleaner Production*, 225, 1052–1064. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.019>
- Ramirez, A., Navarro, L. G., & Conde, J. C. (2010). Degradación química del poli (etilen tereftalato). *Revista Colombiana de Química*, 39(3), 321–331. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/articler/view/20354>
- Sánchez, G. M. (2018). *Degradación catalítica de polietileno de baja densidad utilizando catalizadores de FCC*. [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio DSPACE IPN. <http://tesis.ipn.mx/xmlui/handle/123456789/24873>
- Sangalang, A., Bartolome, L., & Kim, D. H. (2015). Generalized kinetic analysis of heterogeneous PET glycolysis: Nucleation-controlled depolymerization. *Polymer Degradation and Stability*, 115, 45–53. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTA.2015.02.012>
- Sheel, A., & Pant, D. (2019). Chemical Depolymerization of PET Bottles via Glycolysis. *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles* 61-94. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811361-5.00004-3>
- Shurvell, H. F. (2006). *Spectra – Structure Correlations Spectra – Structure Correlations in the Mid- and Far-infrared*. <https://doi.org/10.1002/9780470027325.s4101>
- Stoski, A., Viante, M. F., Nunes, C. S., Muniz, E. C., Felsner, M. L., & Almeida, C. A. P. (2016). Oligomer production through glycolysis of poly(ethylene terephthalate): effects of temperature and water content on reaction extent. *Polymer International*, 65(9), 1024–1030. <https://doi.org/10.1002/pi.5146>
- Wang, T., Liu, H., Zhang, X., Liu, J., Zhang, Y., Guo, Y., & Sun, B. (2018). Catalytic conversion of NO assisted by plasma over Mn-Ce/ZSM5-multi-walled carbon nanotubes composites: Investigation of acidity, activity, and stability of catalyst in the synergic system. *Applied Surface Science*, 457, 187–199. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2018.06.216>
- Wang, T., Shen, C., Yu, G., & Chen, X. (2021). Fabrication of magnetic bimetallic Co–Zn based zeolitic imidazolate frameworks composites as catalyst of glycolysis of mixed plastic. *Fuel*, 304(April), 121397. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121397>
- Xi, G., Lu, M., & Sun, C. (2005). Study on depolymerization of waste polyethylene

terephthalate into monomer of bis(2-hydroxyethyl terephthalate). *Polymer Degradation and Stability*, 87(1), 117–120.  
<https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTA.2004.07.017>

Zhang, H., Choi, J. I., Choi, J. W., Jeong, S. M., Lee, P. S., & Hong, D. Y. (2022). A highly porous MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel-supported Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> as a reusable catalyst for glycolysis of postconsumer PET waste. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 115, 251–262.  
<https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2022.08.006>

Zhao, X., Wei, L., Cheng, S., Huang, Y., Yu, Y., & Julson, J. (2015). Catalytic cracking of camelina oil for hydrocarbon biofuel over ZSM-5-Zn catalyst. *Fuel Processing Technology*, 139, 117–126.  
<https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2015.07.033>

Zheng, Y., Wang, F., Yang, X., Huang, Y., Liu, C., Zheng, Z., & Gu, J. (2017). Study on aromatics production via the catalytic pyrolysis vapor upgrading of biomass using metal-loaded modified H-ZSM-5. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 126, 169–179.  
<https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2017.06.011>

## BIOGRAFÍAS



**Juan, Naranjo Silva**, es Ingeniero Químico graduado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. Investigador externo en el Grupo de Energías Alternativas y Ambiente ESPOCH.



**Paul, Palmay**, es Ingeniero Químico de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Máster en Ingeniería Termodinámica de Fluidos en la Universidad de la Roviri i Virgili - España, PhD en Ingeniería Termodinámica de Fluidos en la Roviri i

Virgili-España. Docente Investigador de la ESPOCH e Investigador Senior en el Grupo de Investigación de Ambiente y Desarrollo.



**Kerly, Jaramillo**, Ingeniera Química graduada en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. Investigadora externa en el Grupo de Energías Alternativas y Ambiente ESPOCH.

1

# Análisis del Lenguaje Natural para la Identificación de Alteraciones Mentales en Redes Sociales: Una Revisión Sistemática de Estudios

Mieles Toloza, Ismael<sup>1,\*</sup> ; Delgado Meza, Jesús<sup>2</sup> ; Acevedo-Suárez, Johana<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de Investigación y Desarrollo -UDI, Psicología virtual, Bucaramanga, Colombia

<sup>2</sup>Universidad de Investigación y Desarrollo -UDI, Psicología, Bucaramanga, Colombia

<sup>3</sup>Universidad de Investigación y Desarrollo -UDI, Psicología virtual, Bucaramanga, Colombia

**Resumen:** Las enfermedades mentales constituyen una de las principales causas de angustia en la vida de las personas a nivel individual, y repercuten en la salud y el bienestar de la sociedad. Para captar estas complejas asociaciones, las ciencias computacionales y la comunicación, a través del uso de métodos de procesamiento del lenguaje natural (NLP) en datos recolectados en redes sociales, han aportado prometedores avances para potenciar la atención sanitaria mental proactiva y ayudar al diagnóstico precoz. Por ello, se realizó una revisión sistemática de la literatura acerca de la detección de alteraciones mentales a través de redes sociales, mediante el uso de NLP en los últimos 5 años, que permitió identificar métodos, tendencias y orientaciones futuras, a través del análisis de 73 estudios, de 509 que arrojó la revisión de documentos extraídos de bases de datos científicas. El estudio reveló que, los fenómenos más comúnmente estudiados, correspondieron a Depresión e Ideación suicida, identificados a través del uso de algoritmos como el LIWC, CNN, LSTM, RF y SVM, en datos extraídos principalmente de Reddit y Twitter. Este estudio, finalmente proporciona algunas recomendaciones sobre las metodologías de NLP para la detección de enfermedades mentales, que pueden ser adoptadas en el ejercicio de profesionales interesados en la salud mental, y algunas reflexiones sobre el uso de estas tecnologías.

**Palabras clave:** redes sociales, salud mental, procesamiento del lenguaje natural, redes neuronales, inteligencia artificial

## Natural Language Analysis for the Identification of Mental Disturbances in Social Networks: A Systematic Review of Studies

**Abstract:** Mental illness is a major cause of distress in people's lives at the individual level and impacts the health and well-being of society. To capture these complex associations, computational science and communication, through the use of natural language processing (NLP) methods on data collected in social networks, have provided promising advances to enhance proactive mental health care and aid in early diagnosis. Therefore, a systematic review of the literature on the detection of mental disorders through social networks, using NLP in the last 5 years, was carried out, which allowed identifying methods, trends and future directions, through the analysis of 73 studies, out of 509 that resulted from the review of documents extracted from scientific databases. The study revealed that the most commonly studied phenomena corresponded to Depression and Suicidal Ideation, identified through the use of algorithms such as LIWC, CNN, LSTM, RF and SVM on data extracted mainly from Reddit and Twitter. This study finally provides some recommendations on NLP methodologies for mental illness detection that can be adopted in the practice of professionals interested in mental health and some reflections on the use of these technologies.

**Keywords:** social networks, mental health, natural language processing, neural networks, machine learning

### 1. INTRODUCCIÓN

La salud mental se ha convertido en una temática de interés general a nivel global, dado el impacto que su afectación en la población puede tener en las esferas económicas, políticas sociales y sanitarias. Sin embargo, la salud mental continúa siendo una de las áreas menos atendidas en salud pública, en

donde cerca de 1000 millones de personas viven con un trastorno mental, 3 millones de personas mueren cada año por el consumo nocivo de alcohol, y una persona se suicida cada 40 segundos (Organización Mundial de la Salud, 2020). Adicionalmente, se sabe que una gran parte de los trastornos que padecen las personas son altamente estigmatizados, lo que contribuye significativamente al sufrimiento de los individuos,

\*mieles1@udi.edu.co

Recibido: 01/04/2023

Aceptado: 21/11/2023

Publicado en línea: 09/02/2024

10.33333/rp.vol53n1.06

CC 4.0

desincentivando la búsqueda de ayuda profesional y promoviendo el ocultamiento de los síntomas. Ante esta situación, y como alternativa para compartir sus pensamientos y sentimientos relacionados con la alteración en salud mental, las redes sociales se han convertido en un medio para la búsqueda de orientación y ayuda por parte de la comunidad que allí interactúa (Chiong, et al., 2021).

Las redes sociales han tenido un marcado éxito y penetración en la población en general, las cuales son muy populares en adolescentes (Ophir et al., 2019) y frecuentemente usadas por adultos (Mendu et al., 2020). Así mismo, la pandemia del Covid-19 y el aislamiento social trajo consigo que, plataformas como Facebook, Instagram, Twitter y Reddit, fueran mucho más utilizadas, ya que se convirtieron en los canales que permitían mantener la interacción social segura, en medio de la crisis sanitaria (Garg, 2021; Koh & Liew, 2020).

Entre las características de las redes sociales, se identifica que el 80% de los datos en estas plataformas es textual, y crecen diariamente a razón de 1.3 millones de nuevas entradas de contenido (Fernández, 2020). Ante esta gigantesca cantidad de información, surge una serie de estrategias de análisis de datos que hace uso de distintas metodologías (Moessner et al., 2018), algunas básicas como el análisis y frecuencia de palabras clave publicadas por un usuario, y otras más complejas como la interpretación del lenguaje natural (NLP) por medio de la inteligencia artificial (Mori & Haruno, 2021) y el aprendizaje profundo (Wongkoblap et al., 2021; Yao et al., 2020) a través de distintos modelos de redes neuronales (Babvey et al., 2021; Melvin et al., 2019), lo que permite el monitoreo y la perfilación de usuarios, esto resulta muy útil en mercadotecnia, pero también, ventajoso para instituciones educativas, gobiernos y la salud pública en general (Nandhini & Sheeba, 2015).

Estas novedosas posibilidades de análisis de datos han despertado el interés de diversos autores y estudios respecto a la identificación de factores, patrones y modelos que puedan predecir los comportamientos de usuarios (Centola, 2010; Zhang et al., 2013), relacionados con temas de salud pública y salud mental (Camacho et al., 2013; Dos Santos et al., 2019; Mori, & Haruno, 2021; Tan, et al., 2021). Por ejemplo, el estudio realizado por Bae et al. (2021) cuya investigación buscó determinar si el aprendizaje automático podía utilizarse eficazmente para detectar signos de esquizofrenia en usuarios de la red social Reddit, a través de la recopilación de publicaciones y el análisis de textos; o la investigación realizada por Chiong et al. (2021) cuyo objetivo fue determinar si el aprendizaje automático podría usarse de manera efectiva para detectar signos de depresión en usuarios de las redes sociales, a través del análisis de sus publicaciones.

De esta manera, se observa un panorama coherente al formulado por la Organización mundial de la salud (2017), el cual refiere que, las alteraciones en salud mental en los últimos años van aumentando, señalando que 1 de cada 4 personas, a nivel global, sufrirá alguna enfermedad mental durante el transcurso de su vida (Confederación Salud mental de España, 2019) para lo cual resulta interesante tener formas alternativas para su prevención, detección y estudios, que funcionen

paralelamente al ejercicio de la psicología clínica y la psiquiatría tradicional.

Es por ello que, a través del presente estudio de revisión sistemática, se buscó examinar documentos científicos que implementaran modelos de análisis del lenguaje natural de textos publicados en redes sociales, para detectar cuáles de ellos han sido más utilizados, qué fenómenos de salud mental fueron los más abordados y las redes sociales más comúnmente usadas como fuente de información, permitiendo conocer el estado actual del problema en cuestión, identificar nuevas tendencias, y promover en los investigadores interesados, la formulación de estudios con impacto disciplinar y social.

## 2. METODOLOGÍA

En este trabajo, se realizó un análisis de la literatura (Palmatier et al., 2018), basado en la Declaración PRISMA (Moher et al., 2009; Perestelo-Pérez, 2013), el cual inició con la revisión de documentos, y continuó con el uso de un enfoque analítico para la identificación, principalmente, de modelos computacionales del lenguaje natural más utilizados para la identificación de alteraciones en salud mental a través de redes sociales. Se siguieron unas pautas metodológicas formuladas por expertos en este tipo de investigación (Cobo et al., 2011), que permitieron el análisis de resultados basado en un modelo aceptado por la comunidad científica (López-Belmonte et al., 2020).

### 2.1 Diseño de la investigación

Partiendo de la revisión sistemática como metodología principal del estudio, se llevó a cabo un diseño de investigación para la búsqueda, registro y análisis de la literatura científica (Martínez et al., 2015), el cual fue acompañado de un análisis de co-palabras (Soler-Costa et al., 2021). Los distintos procesos llevados a cabo en este diseño permitieron obtener los subdominios conceptuales que posibilitaron orientar el proceso de interpretación de resultados.

### 2.2 Procedimiento

El proceso de búsqueda y selección se compuso de cuatro pasos principales: (1) identificación, (2) cribado, (3) elegibilidad (4) inclusión, con el fin de disminuir sesgos en la selección de documentos, tal y como se requiere en este tipo de estudios. Los pasos seguidos fueron los siguientes:

En primer lugar, se seleccionaron las bases de datos para el proceso de búsqueda, entre ellas, Ebsco, Academic Search, APA PsyArticles, APA Psynfo, ERIC, Fuente Académica, MEDLINE, Engineering Index, Software Reviews on File, Psychology and Behavioral Science Collection, SocINDEX With Full Text, Master File Premier, Medline with Full Text y PsicoDoc, así como también las plataformas Web of Science y Scopus, ya que están consideradas como bases de datos mundiales y contienen un amplio número de estudios de impacto indexados.

En segundo lugar, fueron definidas las palabras a utilizar en la ecuación de búsqueda, en donde inicialmente se revisaron estudios de impacto (Al Asad et al., 2019; Gaur et al., 2019;

Katchapakirin et al., 2018), con el propósito de generar una lista de palabras clave para hacerlas parte del proceso de consulta, entre las que se encontraron, en español: procesamiento del lenguaje natural, salud mental y redes sociales; y en inglés: natural language processing, mental health and social network. Lo anterior permitió detectar los documentos científicos que tenían esos términos en el título, el resumen, y palabras clave de las publicaciones indexadas.

En tercer lugar, se estableció la siguiente ecuación de búsqueda en español: “procesamiento del lenguaje natural” AND “salud mental” AND “redes sociales” y para el inglés, “natural language processing” AND “mental health” AND “social network”. Esta ecuación se utilizó para la búsqueda de los títulos de las publicaciones de las bases de datos anteriormente mencionadas. Además, para la selección de categorías de búsqueda en las bases de datos, se escogieron todas aquellas relacionadas con el ámbito de la medicina, ciencias computacionales y psicología.

El proceso de búsqueda y reporte se llevó a cabo entre octubre de 2021 a junio de 2023. En el informe se decidió elegir todo tipo de artículos científicos en idiomas inglés y español, y se intentó abarcar una buena parte de la literatura sobre el estado del problema. Estas acciones dieron como resultado un total de 509 publicaciones, de las cuales 170 correspondieron a documentos duplicados. A continuación, para refinar la búsqueda se establecieron varios criterios; como criterio de inclusión se tomaron los años de publicación de los artículos en el periodo 2018 a 2022, y como criterios de exclusión, se separaron aquellos documentos anteriores a 2018 (n=87), documentos mal indexados en las bases de datos (n=90) y estudios que no reportaran fenómenos de salud mental, datos analizados no provenientes de redes sociales, y que no expresaran uso del procesamiento de lenguaje natural (n=89). La aplicación de estos criterios produjo una unidad de análisis de 73 documentos científicos. Las acciones seguidas se muestran en el diagrama de flujo según la declaración PRISMA (Figura 1), en donde se establece el informe de documentos sobre los constructos analizados y las reducciones sufridas por el volumen inicial, tras la aplicación de los criterios establecidos, hasta llegar a la unidad de análisis final establecida en este estudio.

### 2.3 Análisis de los datos

Todos los artículos finalmente seleccionados (73 en total) fueron analizados y procesados por los investigadores. Se hizo uso de una matriz de sistematización que contempló información referida a: datos de identificación del artículo, estructura teórica y metodológica, y, principales hallazgos. De esta manera, el proceso de análisis permitió la detección de información relacionada con las categorías deductivas definidas: a) redes sociales analizadas, idiomas de publicación y campos de estudio de las publicaciones académicas, b) fenómenos de salud mental más abordados en los estudios y c) modelos de procesamiento del lenguaje natural de textos publicados en redes sociales para la identificación de alteraciones en salud mental; dicha información se obtuvo producto de la concatenación de expresiones comunes, palabras clave, redes de co-palabras (Marín-Marín et al., 2021), extraída de los textos de análisis seleccionados, en las que tres investigadores del presente estudio coincidieron, y

cuyos resultados son expresados en las secciones Resultados y Discusión, de este manuscrito.

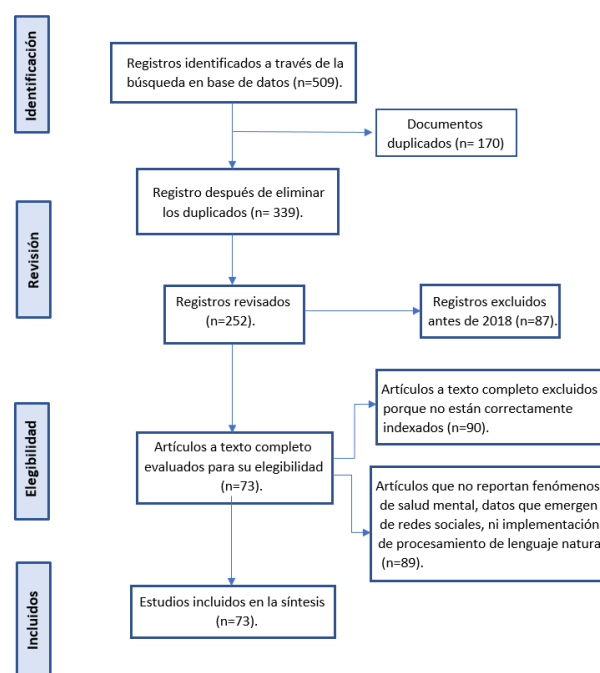


Figura 1. Diagrama de flujo de la información PRISMA a través de las diferentes etapas de la revisión sistemática

## 3. RESULTADOS

Este apartado informa acerca de los resultados obtenidos y relacionados con las categorías deductivas establecidas, que se vinculan a los objetivos definidos para este estudio, otorgando valor en la investigación sobre la detección de enfermedades mentales a través de NLP, cuyo interés, de acuerdo con lo expresado en las investigaciones consultadas, ha ido en crecimiento en los últimos años.

Se iniciará con la presentación de resultados relacionados con metadatos de interés para esta investigación como, año de publicación de artículos, localización e idioma en el que se desarrolló el estudio, áreas del conocimiento de las revistas en donde fueron publicados las investigaciones, y las redes sociales utilizadas para la extracción de información en dichos estudios; posteriormente, se presentarán los algoritmos usados para el NLP y los fenómenos psicológicos más abordados.

### 3.1 Años de publicación de los artículos, país de origen e idiomas de publicación de los estudios

En la búsqueda inicial de documentos de investigación publicados entre los años 2018 y 2022, se observa una tendencia dentro del número de estudios publicados sobre el tema por año (Figura 2), y se identifica un aumento sustancial en el número de publicaciones entre el 2021 y el 2022, siendo este último el año en el que se publicó el 46.5% del total de los documentos seleccionados.

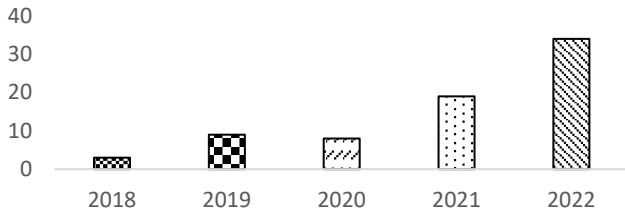


Figura 2. Numero de documentos agrupados por año de publicación

De otro lado, varios países han demostrado su interés en estudiar las alteraciones en salud mental en sus territorios. De los datos extraídos en la presente revisión, se identifica un predominio en el número de publicaciones por parte de EE.UU. (21,9 %), India (21,9 %) y China (8,2 %) (Figura 3); así mismo España destaca como el único país hispano hablante que reporta publicaciones.

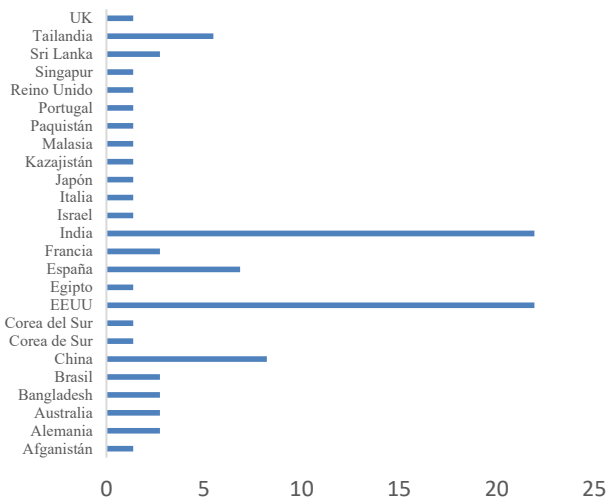


Figura 3. Porcentaje por país de origen de los documentos analizados

El 100% de los documentos incluidos en este estudio se encuentra publicado en inglés. Por su parte, para el análisis de datos, algunas investigaciones utilizaron textos en su lengua materna (Katchapakirin et al., 2018, Eldin et al., 2019; Priya Sri et al., 2021), otros usan textos en su lengua materna traducidos al inglés (López Úbeda et al., 2019; Mehedy et al., 2021; Chatrinan et al., 2021), y en otros, este dato no se indicaban específicamente en los estudios (Wang et al., 2020; Ricard & Hassanpour, 2021; Sabina et al., 2021; Ragheb et al., 2021) (Figura 4).

### 3.2 Áreas del conocimiento de las publicaciones y redes sociales utilizadas en los estudios

Referente a las áreas del conocimiento y/o temáticas de las publicaciones, se identifica el predominio de revistas relacionadas con Ciencias aplicadas, ingeniería y tecnología, seguida por Psicología, comportamiento humano y salud mental (Figura 5).

### 3.3 Red social, tipo de dato, alteración de salud mental y algoritmos

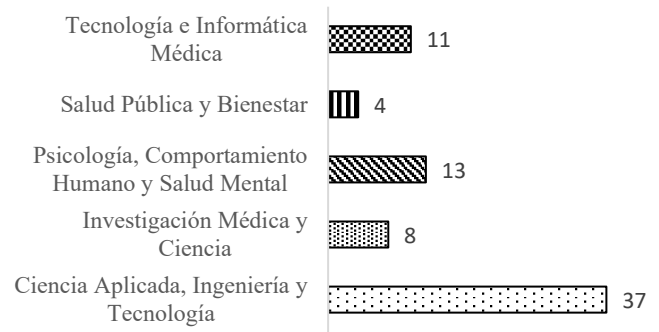


Figura 5. Tema general de la revista y número de artículos relacionados con dicha temática

En lo que tiene que ver con las redes sociales más utilizadas en los estudios, y que permitieron la recopilación de datos para su posterior análisis, en su orden correspondieron a, Twitter (48,4 %), Reddit (25,8 %) y Facebook (12,9%) (Figura 6).

El tipo de dato analizado en el 100% de los estudios corresponde a textos, sin embargo, el 6,3% de los estudios revisados incluyó, de forma adicional, análisis de imágenes como fotografías, emoticones o ilustraciones.

Respecto a las tecnologías implementadas para el NLP, se observó un uso frecuente de algoritmos de machine learning, deep learning y softwares o librerías diseñadas para el análisis del lenguaje natural; entre los más frecuentemente implementados destacan para la etapa de preprocesamiento el Word2Vec con el 25% de los estudios, TF-IDF (25%) y el GloVe (18%), para la etapa de clasificación el LIWC (39%), CNN (32%), LSTM (33%), RF (32%), SVM (31%). Es conveniente señalar que muchos estudios planteaban su modelo con más de un algoritmo en sus metodologías de análisis (Figura 6).

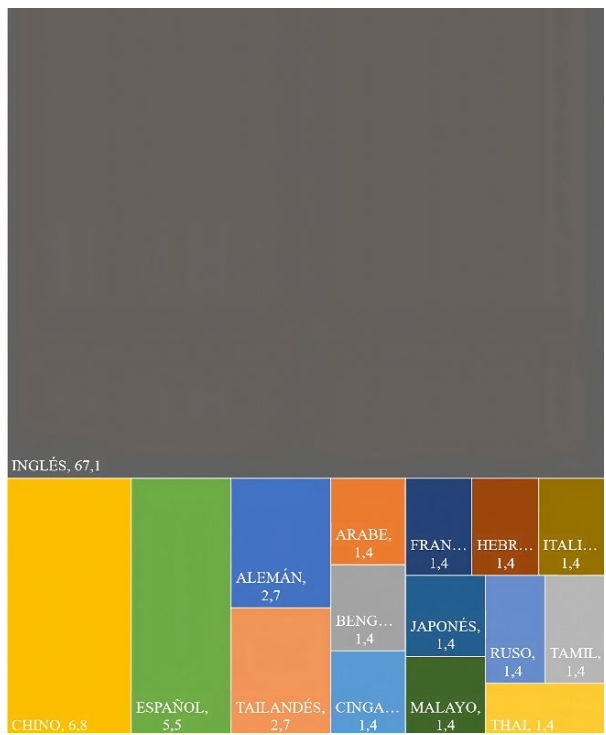


Figura 4. Porcentaje del idioma de los textos analizados en los estudios incluidos



| Tabla 1. Glosario de tecnologías usadas |                             |                                                         | Cont Tabla 1. Glosario de tecnologías usadas |       |                                                                   |
|-----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------|
| GRUPO                                   | SIGLA                       | ALGORÍTMO                                               | GRUPO                                        | SIGLA | ALGORÍTMO                                                         |
| Preprocesamiento Tokenizado             | Bow                         | Bag of Words                                            |                                              | RF    | Random Forests                                                    |
|                                         | CBoW                        | Continuous Bag of Words                                 |                                              | SGD   | Stochastic Gradient Descent                                       |
| Preprocesamiento Vectorizado            | GloVe                       | Global Vectors for Word Representation                  |                                              | SUN   | Semantic Understanding Network                                    |
|                                         | Word2Vec                    | Algoritmo Word2vec                                      |                                              | SVM   | Support Vector Machine                                            |
| TPreprocesamiento Vectorizado           | XLM-R                       | Cross-lingual Language Model Pretraining                |                                              | XLNet | Generalized Autoregressive Pretraining for Language Understanding |
|                                         | TF-IDF                      | Term frequency – Inverse document frequency             |                                              |       |                                                                   |
| Categorización                          | CNN                         | Convolutional Neural Network                            | Categorización                               |       |                                                                   |
|                                         | GRU                         | Gated Recurrent Unit                                    |                                              | LIWC  | Linguistic Inquiry and Word Count                                 |
|                                         | HAN                         | Hierarchical Attention Network                          |                                              | NLTK  | Natural Language Toolkit                                          |
|                                         | LSTM                        | Long Short-Term Memory                                  |                                              |       |                                                                   |
|                                         | MLP                         | Multilayer Perceptron                                   |                                              | SMOTE | Synthetic Minority Oversampling Technique                         |
|                                         | NCNL                        | Negatively Correlated Noisy Learners                    |                                              | VADER | Valence Aware Dictionary and Sentiment Reasoner                   |
|                                         | RMN                         | Relationship Modeling Network                           |                                              |       |                                                                   |
|                                         | RNN                         | Recurrent Neural Network                                |                                              |       |                                                                   |
|                                         | AVNNET                      | Neural Networks Using Model Averaging                   |                                              |       |                                                                   |
|                                         | BERT                        | Bidirectional Encoder Representations from Transformers |                                              |       |                                                                   |
|                                         | CGB                         | Powell-Beale Algorithm                                  |                                              |       |                                                                   |
|                                         | DT                          | Decision Tree                                           |                                              |       |                                                                   |
|                                         | EUN                         | Emotional Understanding Network                         |                                              |       |                                                                   |
|                                         | FP-Tree                     | Frequent Pattern Tree                                   |                                              |       |                                                                   |
|                                         | KNN                         | K-Nearest-Neighbor                                      |                                              |       |                                                                   |
| LDA                                     | Latent Dirichlet Allocation |                                                         |                                              |       |                                                                   |
| LR                                      | Logistic Regression         |                                                         |                                              |       |                                                                   |
| MIL                                     | Multiple Instance Learning  |                                                         |                                              |       |                                                                   |
| NB                                      | Naive Bayes                 |                                                         |                                              |       |                                                                   |

El uso de distintos algoritmos para el NLP configura el modelo implementado en los análisis de las alteraciones de salud mental, en donde a su vez, destacan las unidades de análisis, comprendidas por las redes sociales contempladas en el estudio como fuente de información, la forma de extracción de la data (Figura 6), siendo en muchos casos grupales (71,6%) a través de un foro temático, corpus preexistentes o un hashtag y/o individuales (28,4%), de lo cual se consiguió la información publicada por usuarios específicos (Tabla 2).

### 3.4 Fenómenos de Salud mental estudiados en las investigaciones

Finalmente, en lo que corresponde a los fenómenos psicológicos, se identificó un notable interés, por parte de los estudios, en las alteraciones de salud mental relacionadas con factores emocionales (Figura 6), siendo la Depresión (33,9%), la Ideación Suicida (16,1%) y la Ansiedad (9,8%), las temáticas que con mayor frecuencia son reportadas como objeto de análisis en los estudios seleccionadas. Cabe mencionar que, fenómenos como Estrés (4,5%), la Bipolaridad (3,6%), la Soledad (3,6%) los Desórdenes Alimenticios (3,6%) y el Cyberbullying (3,6%), son temáticas que han venido posicionándose como fenómenos de interés y pueden resultar mucho más interesantes en el desarrollo de estudios posteriores (Figura 6).

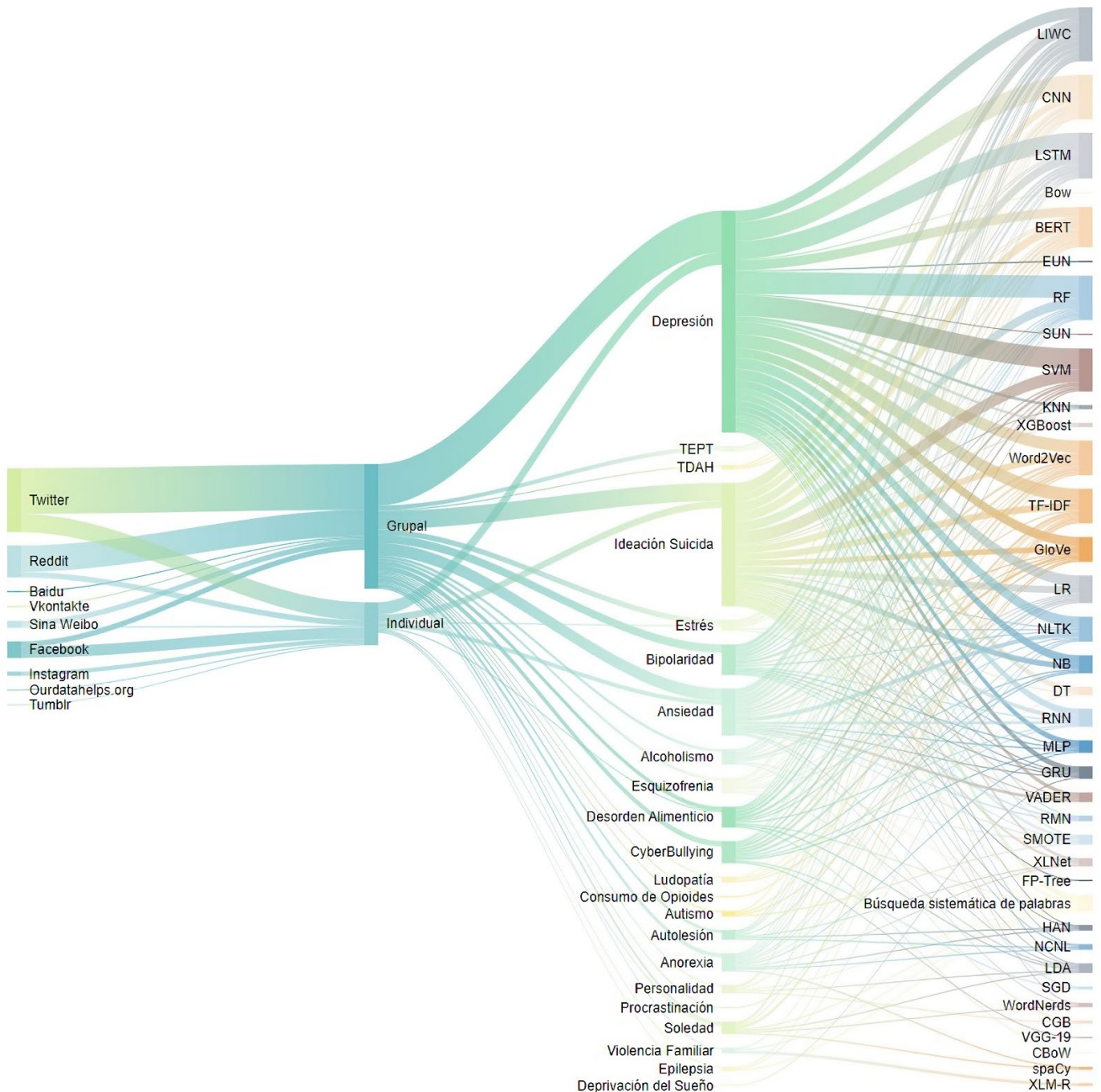


Figura 6. Frecuencia en la red social, tipo de dato, alteración de salud mental y algoritmos implementados en los documentos analizados

Tabla 2. Autores por uso de algoritmo y alteración de salud mental más frecuentes

| ALGORITMO                        | ANSIEDAD              | BIPOLARIDAD           | DEPRESIÓN                                                                                                                                                       | IDEACIÓN SUICIDA                                                                           | SOLEDAD             |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Bow                              |                       |                       | Ferreira et al., 2022                                                                                                                                           |                                                                                            |                     |
| Búsqueda sistemática de palabras |                       |                       | Ophir et al.,2019; Ren et al., 2021; Ramirez-Cifuentes et al., 2021; Narynov et al.,2020                                                                        | Ramírez-Cifuentes et al., 2021; Ambalavan et al., 2019                                     | Guntuku et al.,2019 |
| GloVe                            | Silveira et al., 2018 | Silveira et al., 2018 | Ren et al., 2021; Wongkoblap et al., 2021; Ramirez-Cifuentes et al., 2021; Silveira et al., 2018; Uban et al., 2021; Ferreira et al., 2022; Nadeem et al., 2022 | Yao et al., 2020; Ramirez-Cifuentes et al., 2021; Silveira et al., 2018; Uban et al., 2021 |                     |
| spaCy                            |                       |                       |                                                                                                                                                                 |                                                                                            | Koh y Liew, 2020;   |

Cont. **Tabla 2.** Autores por uso de algoritmo y alteración de salud mental más frecuentes.

| ALGORITMO | ANSIEDAD                                                                                                 | BIPOLARIDAD                                                    | DEPRESIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | IDEACIÓN SUICIDA                                                                                                                                                                    | SOLEDAD                                   |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| TF-IDF    | Mendu et al., 2020;                                                                                      |                                                                | Guntuku et al., 2019; Al Asad et al., 2019; Li et al., 2022; Sun y Luo, 2022; Kour y Gupta, 2022; Kumar et al., 2022; Sarkar et al., 2022; Kumar y Nisha, 2022; Ferreira et al., 2022                                                                                                                                          | Yao et al., 2020; Sun y Luo, 2022; Kour y Gupta, 2022; Chatterjee et al., 2022; Noraset et al., 2022                                                                                | Guntuku et al., 2019; Mendu et al., 2020; |
| Word2Vec  | Kim et al., 2020; Nasrullah y Jalali, 2022                                                               | Kim et al., 2020; Nasrullah y Jalali, 2022                     | Joshi y Patwardhan, 2020; Wongkoblap et al., 2021; Ramírez-Cifuentes et al., 2021; Narynov et al., 2020; Eldin et al., 2019; Kour y Gupta, 2022; Tejaswini et al., 2022; Chadha y Kaushik, 2022; Kour y Gupta, 2022                                                                                                            | Yao et al., 2020; Ramírez-Cifuentes et al., 2021; Glaser et al., 2020; Kour y Gupta, 2022; Liu et al., 2022                                                                         |                                           |
| BERT      | Silveira et al., 2021; Viviani et al., 2021; Zanwar, et al., 2022                                        | Silveira et al., 2021; Zanwar, et al., 2022                    | Silveira et al., 2021; Ramírez-Cifuentes et al., 2021; Chatrinan et al., 2021; Ragheb et al., 2021; Prince y Srinivas, 2022; Yang et al., 2022; Kumar y Nisha, 2022;                                                                                                                                                           | Silveira et al., 2021; Ramírez-Cifuentes et al., 2021; Chatrinan et al., 2021; Ragheb et al., 2021; Prince y Srinivas, 2022; Noraset et al., 2022; Schoene et al., 2022             |                                           |
| CNN       | Kim et al., 2020; Wang et al., 2020; Nasrullah y Jalali, 2022                                            | Kim et al., 2020; Wang et al., 2020; Nasrullah y Jalali, 2022  | Wongkoblap et al., 2021; Ramírez-Cifuentes et al., 2021; Chatrinan et al., 2021; Wang et al., 2020; Tejaswini et al., 2022; Prince y Srinivas, 2022; Rego et al., 2021; Chadha y Kaushik, 2022; Kour y Gupta, 2022; Yang et al., 2022; Kumar y Nisha, 2022; Meena y Thulasi Bai, 2022; Saini et al., 2022; Nadeem et al., 2022 | Yao et al., 2020; Ramírez-Cifuentes et al., 2021; Chatrinan et al., 2021; Sun y Luo, 2022; Prince y Srinivas, 2022; Schoene et al., 2022                                            |                                           |
| DT        |                                                                                                          |                                                                | Chiong et al., 2021; Li et al., 2022; Chanda et al., 2022; Kumar y Nisha, 2022                                                                                                                                                                                                                                                 | Liu et al., 2022                                                                                                                                                                    |                                           |
| EUN       |                                                                                                          |                                                                | Ren et al., 2021                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                     |                                           |
| FP-Tree   |                                                                                                          |                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Glaser et al., 2020                                                                                                                                                                 |                                           |
| GRU       | Silveira et al., 2021                                                                                    | Silveira et al., 2021                                          | Silveira et al., 2021; Wongkoblap et al., 2021; Yang et al., 2022; Nadeem et al., 2022                                                                                                                                                                                                                                         | Silveira et al., 2021                                                                                                                                                               |                                           |
| HAN       |                                                                                                          |                                                                | Uban et al., 2021                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Uban et al., 2021                                                                                                                                                                   |                                           |
| KNN       |                                                                                                          |                                                                | Li et al., 2022; Chanda et al., 2022                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Lekkas et al., 2021                                                                                                                                                                 |                                           |
| LDA       | Mendu et al., 2020;                                                                                      |                                                                | Kumar et al., 2022                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Chatterjee et al., 2022                                                                                                                                                             | Mendu et al., 2020;                       |
| LIWC      | Mendu et al., 2020; Silveira et al., 2021; Viviani et al., 2021; Wang et al., 2020; Zanwar, et al., 2022 | Silveira et al., 2021; Wang et al., 2020; Zanwar, et al., 2022 | Guntuku et al., 2019; Silveira et al., 2021; Wongkoblap et al., 2021; Ramírez-Cifuentes et al., 2021; Uban et al., 2021; Wang et al., 2020; Prince y Srinivas, 2022; Chanda et al., 2022                                                                                                                                       | Lekkas et al., 2021; Silveira et al., 2021; Ramírez-Cifuentes et al., 2021; Uban et al., 2021; Arilla et al., 2022; Prince y Srinivas, 2022; Liu et al., 2022; Schoene et al., 2022 | Guntuku et al., 2019; Mendu et al., 2020; |
| LR        |                                                                                                          |                                                                | Chiong et al., 2021; Ramírez-Cifuentes et al., 2021; Sun y Luo, 2022; Kumar et al., 2022; Yang et al., 2022; Sarkar et al., 2022; Kumar y Nisha, 2022; Ferreira et al., 2022                                                                                                                                                   | Yao et al., 2020; Ramírez-Cifuentes et al., 2021; Ambalavan et al., 2019; Sun y Luo, 2022; Chatterjee et al., 2022; Liu et al., 2022                                                |                                           |
| LSTM      | Nasrullah y Jalali, 2022; Zanwar, et al., 2022; Chen et al., 2022                                        | Nasrullah y Jalali, 2022; Zanwar, et al., 2022                 | Ren et al., 2021; Narynov et al., 2020; Priya Sri et al., 2021; Chatrinan et al., 2021; Uban et al., 2021; Eldin et al., 2019; Tejaswini et al., 2022; Chadha y Kaushik, 2022; Kour y Gupta, 2022; Yang et al., 2022; Chen et al., 2022; Meena y Thulasi Bai, 2022; Nadeem et al., 2022                                        | Coppersmith et al., 2018; Chatrinan et al., 2021; Uban et al., 2021; Arilla et al., 2022; Noraset et al., 2022; Chen et al., 2022; Schoene et al., 2022                             |                                           |

**Cont. Tabla 2.** Autores por uso de algoritmo y alteración de salud mental más frecuentes

| ALGORITMO | ANSIEDAD                                                     | BIPOLARIDAD                                | DEPRESIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | IDEACIÓN SUICIDA                                                                                                                                                                                 | SOLEDAD               |
|-----------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| MLP       | Wang et al., 2020                                            | Wang et al., 2020                          | Chiong et al.,2021; Wongkoblap et al., 2021; Mehedy et al., 2022; Wang et al., 2020                                                                                                                                                                                                                                                                       | Ambalavan et al., 2019                                                                                                                                                                           |                       |
| NB        |                                                              |                                            | Mehedy et al., 2022; Al Asad et al., 2019; Li et al., 2022; Sun y Luo, 2022; Kour y Gupta, 2022; Ferreira et al., 2022                                                                                                                                                                                                                                    | Lekkas et al., 2021; Sun y Luo, 2022; Noraset et al., 2022; Liu et al., 2022                                                                                                                     |                       |
| NCNL      |                                                              |                                            | Ragheb et al., 2021                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Ragheb et al., 2021                                                                                                                                                                              |                       |
| NLTK      | Kim et al., 2020: Nasrullah y Jalali, 2022; Chen et al, 2022 | Kim et al., 2020; Nasrullah y Jalali, 2022 | Chiong et al.,2021; Joshi y Patwardhan, 2020; Katchapakirin er al., 2018; Al Asad et al., 2019; Tejaswini et al., 2022; Rego et al., 2021; Yang et al., 2022; Chen et al, 2022                                                                                                                                                                            | Ambalavan et al., 2019; Chen et al, 2022                                                                                                                                                         |                       |
| RF        | Wang et al., 2020                                            | Wang et al., 2020                          | Chiong et al.,2021; Guntuku et al.,2019; Ramirez-Cifuentes et al., 2021; Katchapakirin er al., 2018; Mehedy et al., 2022; Chatrinan et al., 2021; Wang et al., 2020; Sun y Luo, 2022; Kour y Gupta, 2022; Chanda et al.,2022; Kumar et al., 2022; Kour y Gupta, 2022; Sarkar et al., 2022; Kumar y Nisha, 2022; Ferreira et al., 2022; Saini et al., 2022 | Yao et al., 2020; Ramírez-Cifuentes et al., 2021; Chatrinan et al., 2021; Sun y Luo, 2022; Sun y Luo, 2022; Kour y Gupta, 2022; Liu et al., 2022                                                 | Guntuku et al.,2019   |
| RMN       | Silveira et al., 2018                                        | Silveira et al., 2018                      | Silveira et al., 2018                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Silveira et al., 2018                                                                                                                                                                            |                       |
| RNN       | Silveira et al., 2021; Chen et al, 2022                      | Silveira et al., 2021                      | Silveira et al., 2021; Priya Sri et al. 2021; ElDin et al., 2019; Chen et al, 2022; Kumar y Nisha, 2022                                                                                                                                                                                                                                                   | Silveira et al., 2021; Yao et al., 2020; Chen et al, 2022                                                                                                                                        |                       |
| SGD       |                                                              |                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Ambalavan et al., 2019                                                                                                                                                                           |                       |
| SMOTE     | Kim et al., 2020                                             | Kim et al., 2020                           | Chatrinan et al., 2021                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Chatrinan et al., 2021; Noraset et al., 2022                                                                                                                                                     |                       |
| SUN       |                                                              |                                            | Ren et al., 2021                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                  |                       |
| SVM       | Wang et al., 2020; Chen et al, 2022                          | Wang et al., 2020                          | Chiong et al.,2021; Katchapakirin er al., 2018; Mehedy et al., 2022; Chatrinan et al., 2021; Wang et al., 2020; Al Asad et al., 2019; Kour y Gupta, 2022; Prince y Srinivas, 2022; Chanda et al.,2022; Kumar et al., 2022; Sarkar et al., 2022; Chen et al, 2022; Kumar y Nisha, 2022; Ferreira et al., 2022; Saini et al., 2022                          | Yao et al., 2020; Ambalavan et al., 2019; Chatrinan et al., 2021; Kour y Gupta, 2022; Prince y Srinivas, 2022; Chatterjee et al., 2022; Noraset et al., 2022; Liu et al., 2022; Chen et al, 2022 |                       |
| VADER     | Silveira et al., 2021; Viviani et al., 2021                  | Silveira et al., 2021                      | Silveira et al., 2021; Li et al., 2022; Ferreira et al., 2022                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Silveira et al., 2021                                                                                                                                                                            |                       |
| WordNerds | Marshall et al., 2022                                        |                                            | Marshall et al., 2022                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                  | Marshall et al., 2022 |
| XLNet     |                                                              |                                            | Ragheb et al., 2021; Prince y Srinivas, 2022                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Ragheb et al., 2021; Prince y Srinivas, 2022                                                                                                                                                     |                       |
| XGBoost   |                                                              |                                            | Lekkas et al., 2021; Kim et al., 2020; Kumar et al., 2022; Sarkar et al., 2022; Saini et al., 2022                                                                                                                                                                                                                                                        | Chatterjee et al., 2022                                                                                                                                                                          |                       |

**4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

De acuerdo con los resultados obtenidos en la revisión, en primer lugar, se destaca el número de publicaciones sobre procesamiento del lenguaje natural para el análisis de fenómenos de salud mental a partir de datos en redes sociales durante de los años de observación, siendo los años 2022 y 2021, los de mayor producción científica sobre el tema. Dicho aumento en los últimos dos años se atribuye como producto de

la pandemia de Covid-19 y pos pandemia, no sólo porque algunos estudios indagaban sobre afectaciones emocionales por el Covid a través de redes sociales (Babvey et al. 2021), sino que, ante la dificultad de realizar estudios de forma presencial, se dio prioridad al análisis del comportamiento por medios digitales como redes sociales, ya que esto no implicaba un contacto directo con los participantes (Hlatshwako et al., 2021).

Por su parte, en lo referente al idioma de publicación, todos los documentos consultados fueron publicados originalmente en inglés, a pesar que los orígenes de las investigaciones fueron de países no angloparlantes como Alemania (Fazekas et al., 2021), Francia (Ambalavan et al., 2019), Italia (Viviani et al., 2021) o España (Sabina et al., 2021; Ardila et al., 2022) en Europa; Bangladesh (Mehedy et al., 2021), China (Li et al., 2021; Sun & Luo, 2022), Corea del sur (Kim et al., 2020), India (Joshi & Patwardhan, 2020; Kour & Gupta, 2022; Tejaswini et al., 2022), Israel (Ophir et al., 2019), Japón (Mori & Haruno, 2021), Kazajistán (Narynov et al., 2020), Malasia (Priya et al., 2021), Singapur (Koh & Liew, 2020), Sri Lanka (Perera, & Fernando, 2021) y Tailandia (Katchapakirin et al., 2018) en Asia; Brasil (Silverira et al., 2021) en Latinoamérica o Egipto (ElDin et al., 2019) en África.

De esta manera, la mayoría de los estudios realizaron sus análisis sobre textos en inglés, siendo algunos de ellos extraídos en su idioma original y luego traducidos al inglés para el análisis (Chatrinan et al., 2021; ElDin et al., 2019; Katchapakirin et al., 2018; López et al., 2019; Narynov et al. 2020; Priya Sri et al., 2021). Todo ello se debe a que, gran parte de las tecnologías para el análisis del lenguaje natural fue desarrollada para la interpretación de textos en inglés como, por ejemplo, el Word2Vec, BoW o el NLTK, por lo cual muchas de estas herramientas no están adaptadas a las particularidades de otros idiomas (Chatrinan et al., 2021).

En cuanto a las temáticas de las publicaciones, se identificó que, la ciencia aplicada, la ingeniería y la tecnología, son el interés principal de las revistas que publicaron los documentos seleccionados, aunque también, con menor frecuencia, se encontraron las revistas con temática de psicología, comportamiento humano y salud mental, campos que deberían resultar más notables, tomando en cuenta que la salud mental es tópico fundamental en su área de estudio. Este fenómeno puede atribuirse al conocimiento especializado que se requiere para la extracción, la depuración y el procesamiento del lenguaje natural de los datos, tareas mucho más cotidianas en las ciencias informáticas que en las ciencias sociales y de la salud, donde pueden parecer distantes, poco frecuentes o desconocidas (Urban & Gates, 2021).

En lo referente a las fuentes de información en los estudios analizados, se identifica que las redes sociales más usadas fueron Twitter y Reddit, seguida de Facebook, cuyo resultado es similar al obtenido por Zhang et al. (2022), quienes consideran que estas redes sociales, además de ser de las más estudiadas y populares (Harrigian et al., 2020), se caracterizan por la predominancia de textos, organizando la información a través de palabras clave, hashtags, hilos, etc. (Ricard & Hassanpour, 2021). Adicionalmente, Twitter permite la recopilación de información por medio de su API (Interfaz de programación de aplicaciones) y Reddit organiza las temáticas por medio de foros denominados subreddits, lo que facilita la extracción de los datos relevantes para cada investigación, tarea mucho más compleja en redes sociales con predominancia audiovisual como Facebook, Instagram o Tumblr, las cuales son infrutilizadas en investigaciones de salud mental (Harrigian et al., 2020).

Los fenómenos de salud mental abordados en los documentos seleccionados evidencian un especial interés por las alteraciones emocionales, siendo la depresión, la ideación suicida y la ansiedad, las temáticas con mayor frecuencia en las investigaciones, y cuyo resultado es coherente con el estudio realizado por Chancellor & De Choudhury (2020), en donde la depresión y el suicidio también resultan ser los fenómenos más recurrentes en su análisis. Así mismo, las alteraciones emocionales presentan una alta prevalencia en la población mundial, de acuerdo al informe de la OMS (2017) y cuya situación se vio exacerbada en el periodo de confinamiento y distanciamiento social por Covid-19, lapso en el cual se reporta una mayor prevalencia de sintomatología depresiva, ansiedad, comportamiento suicida, entre otras alteraciones de salud mental en la población a nivel global (Huarcaya-Victoria, 2020; Kumar & Nayar, 2021; Mac-Ginty et al., 2021).

Respecto al procesamiento de los datos, se identifican dos grupos de algoritmos fundamentales para el NLP; en primer lugar los de ordenamiento, en donde se limpia la data eliminando la información irrelevante como los emoticones o signos de puntuación, se tokeniza la data, se divide el contenido en palabras individuales y se convierte ("No, es triste") en un arreglo ["No", ",", "es", "triste"] y se vectoriza, proceso en el que se convierten los tokens en vectores numéricos comprensibles para los algoritmos de aprendizaje automático, modelos que generalmente requieren datos de entrada numérica. Entre los más frecuentemente usados se detectaron el TF-IDF, Word2Vec, GloVe.

En segundo lugar, entre los algoritmos de clasificación usados para la identificación de alteraciones psicológicas, en los documentos revisados, se identifica el SVM, RF, CNN, LIWC y el LSTM, siendo este último el que mayor precisión evidenció en el análisis de las alteraciones emocionales como la depresión y la ideación suicida (Zhang et al., 2017; ElDin et al., 2019; Ren et al., 2021; Chadha & Kaushik, 2022; Kour & Gupta, 2022; Yang et al., 2022). Por su parte Gong et al. (2018), indica que el uso de LIWC puede superar la dificultad de obtener datos a gran escala en el campo de la salud, esto es especialmente relevante en el entrenamiento de modelos de Deep Learning, ya que un diccionario creado por humanos puede proporcionar una alternativa efectiva y concisa al aprendizaje automático para convertir texto en representaciones vectoriales.

A pesar de las grandes ventajas que el análisis de textos de redes sociales para la identificación de alteraciones psicológicas a través de NLP representa, es importante ejercer prudencia en su uso y destacar la necesidad de contar con el acompañamiento de profesionales en salud mental para un diagnóstico adecuado (Calvo et al., 2017). Si bien esta herramienta puede ser útil para la detección temprana de alteraciones psicológicas como lo promueve el proyecto eRisk (Crestani et al., 2022), se debe tener en cuenta que los datos analizados pueden estar sujetos a sesgos, por ejemplo, al considerar variables de personalidad como la "triada oscura", que con frecuencia tiene una presencia más activa en las redes sociales (Preotiuc-Pietro et al., 2016), lo que puede generar una mayor representación en los datos recolectados. Así mismo, el exacerbar el control de la información digital para

mantener la privacidad, debe ser un compromiso implícito establecido en los estudios, ya que estos pueden ser utilizados para ser analizados y comercializados en mercados secundarios, generando preocupaciones sobre las implicaciones éticas del uso de datos públicos, la calidad de estos, las consecuencias de una mala interpretación y la vulneración de la privacidad (Bauer et al., 2017).

Particularmente en los aspectos éticos, Wongkoblap et al. (2017) en su estudio, destacan la inexistencia de una ruta clara en el uso de la data pública proveniente de redes sociales, ya que, se evidencian prácticas adoptadas de forma autónoma en cada estudio, que varían de un investigador a otro, lo que resulta similar a lo encontrado en la presente investigación, en donde pocas publicaciones, principalmente aquellas que analizaron los datos de usuarios individuales, contaron algunas con avales éticos (Fazekas et al., 2021; Guntuku et al., 2019; Katchapakirin et al., 2018; Kim et al., 2020; Mori & Haruno, 2021; Ambalavan et al., 2019; Ramírez-Cifuentes et al., 2021; Schoene et al., 2022; Wongkoblap et al., 2021), mientras que la gran mayoría, interesados en el análisis de forma grupal, no detallan ninguna consideración ética en sus estudios.

Lo anterior, conduce a reflexionar acerca de la importancia de tener en cuenta, para este tipo de investigaciones, aspectos como, las fuentes de sesgo, las implicaciones éticas, y el acompañamiento de profesional del área de la salud, en el análisis automatizado, y obtener con ello, una comprensión completa, adecuada y responsable del fenómeno.

## 5. CONCLUSIONES

El interés de esta investigación se encaminó hacia la detección de modelos de lenguaje natural para la identificación de alteraciones mentales en redes sociales. Dicha detección precoz de síntomas de trastornos mentales es una estrategia importante y eficaz para otorgar datos que aportan al diagnóstico de la salud mental en la población., a partir de los hallazgos se puede concluir que:

Existe un aumento significativo en la cantidad de publicaciones sobre el procesamiento del lenguaje natural para el análisis de fenómenos de salud mental en datos de redes sociales, especialmente en los años 2021 y 2022 durante la pandemia de COVID-19.

La mayoría de los estudios consultados fueron publicados originalmente en inglés, a pesar de que las investigaciones se realizaron en diversos países no angloparlantes de Europa, Asia, Latinoamérica, Oceanía y África.

Las revistas con temáticas de ciencia aplicada, ingeniería y tecnología, son las que predominan en la publicación de los documentos, en comparación con las revistas especializadas en psicología, comportamiento humano y salud mental.

Las redes sociales más utilizadas para la recopilación de datos en los estudios son Twitter y Reddit, debido a su predominancia de texto y facilidad para la extracción de información relevante. En contraste, redes sociales audiovisuales como Facebook, Instagram y Tumblr, son menos utilizadas en investigaciones de salud mental. Así

mismo, la extracción de datos de forma grupal es el común denominador de los estudios.

Los trastornos emocionales como la depresión, la ideación suicida y la ansiedad, son los temas más frecuentemente abordados en los estudios consultados, lo cual es coherente con la alta prevalencia de estos trastornos a nivel mundial, especialmente durante la pandemia de COVID-19.

En cuanto al procesamiento de datos, se identifican dos grupos principales de algoritmos utilizados en el procesamiento del lenguaje natural: los algoritmos de ordenamiento para limpiar y preparar los datos, y los algoritmos de clasificación, siendo los algoritmos SVM, RF, CNN, LIWC y LSTM los más usados, para la identificación de alteraciones psicológicas. Cabe mencionar que los modelos propuestos por los estudios contemplan una combinación de ellos y de forma general todos reportaban efectividades elevadas.

En el futuro, el desarrollo de nuevos métodos que incluyan diferentes estrategias de aprendizaje, nuevos paradigmas de procesamiento de lenguaje natural, modelos y métodos multimodales, validados y aplicados en distintos contextos, apoyarán la detección de enfermedades mentales con un énfasis en la interpretabilidad, lo que resulta crucial para la aceptación de las aplicaciones de detección por parte de profesionales de la salud.

Así mismo, es importante destacar algunas preocupaciones sobre el componente ético implementado en estos estudios, dado que no se identificó una regulación clara sobre la recopilación y el manejo de datos, sino más bien, una serie heterogénea de estrategias adelantadas por iniciativa de los mismos autores. Esto genera interrogantes sobre las consecuencias que esta información pueda tener en contextos sanitarios, políticos y sociales, llevando a sugerir, para futuras investigaciones, con similares características, la consulta de publicaciones como la de Arigo et al. (2018) quien propone algunas directrices éticas relevantes para el desarrollo de estos estudios.

Como limitaciones en este estudio, se destaca que la selección de artículos se llevó a cabo a través de unas bases de datos, dejando de lado algunas otras que bien pueden brindar información complementaria. Sólo se seleccionaron los artículos relacionados con los datos extraídos de redes sociales, y aquellos que utilizan NLP para la detección de alteraciones en salud mental.

Los retos que deja esta investigación podrán abordarse en investigaciones futuras sobre la detección de problemas de salud mental. Aspectos como, los modelos, ubicaciones de los estudios, el idioma, la diversidad de fuentes de datos, el tipo de extracción de datos, no sólo de textos, sino también, imágenes, audios y videos, se convertirán en áreas potenciales de exploración, ya que, como bien se ha revelado en este estudio, la utilización de algoritmos o híbridos para la detección de enfermedades mentales o emocionales, se podrán convertir en fuentes de información que aporten a la formulación de alternativas de prevención, promoción y control, en políticas públicas.

Por último, se debe manifestar que la presente investigación ofrece información sobre una serie de herramientas de aprendizaje automático que emplean muchas de las técnicas de NLP, capaces de ofrecer a las instituciones u organizaciones de salud competentes una ayuda sistemática en el rastreo de la actividad de los usuarios en las redes sociales. Se destaca las herramientas acá expuestas, las cuales demuestran la capacidad de generar alertas tempranas ante evidencia de padecimientos asociados a algún tipo de trastorno mental, aspecto que potencia una intervención anticipada y oportuna, además de dar cabida al desarrollo de alternativas en el tratamiento temprano de trastornos psicológicos.

Los resultados son prometedores y arrojan luz sobre muchas aplicaciones en el mundo real para la detección precoz de alteraciones mentales a partir de los datos de las redes sociales.

#### Declaración de intereses concurrentes

Los autores declaran que no tienen intereses contrapuestos.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Investigación y Desarrollo -UDI por su apoyo administrativo durante este estudio. Las interpretaciones, conclusiones y análisis son de exclusiva responsabilidad de los autores y no comprometen ni vinculan de ninguna manera a la Universidad de Investigación y Desarrollo -UDI o a las instituciones a las que los autores están afiliados.

#### Detalles de la financiación

Este trabajo fue financiado por la Universidad de Investigación y Desarrollo -UDI, Bucaramanga, Colombia.

### REFERENCIAS

- Al Asad, N., Pranto, M., Afreen, S., & Islam, M. (2019). Depression detection by analyzing social media posts of user. *International Conference on Signal Processing, Information, Communication & Systems*, 13-17. <http://dx.doi.org/10.1109/SPICSCON48833.2019.9065101>
- Ambalavan, A. K., Moulahi, B., Azé, J. & Bringay, S. (2019). Unveiling online suicide behavior: What can we learn about mental health from suicide survivors of Reddit?. *MedInfo*, 264(1), 50-54. <https://doi.org/10.3233/SHTI190181>
- Arigo, D., Pagoto, S., Carter-Harris, L., Lillie, S., & Nebeker, C. (2018). Using social media for health research: Methodological and ethical considerations for recruitment and intervention delivery. *Digital health*, 4, 1-15. <https://doi.org/10.1177/2055207618771757>
- Arilla-Andrés, S., García-Martínez, C., & Hoyo, Y. L. Del. (2022). Detection of Suicide Risk Through Social Media: Pilot Study. *Revista Internacional de Tecnología, Ciencia y Sociedad*, 11. <https://doi.org/10.37467/revtechno.v11.4384>
- Babvey, P., Capela, F., Cappa, C., Lipizzi, C., Petrowski, N. & Ramirez-Marquez, J. (2021). Using social media data for assessing children's exposure to violence during the COVID-19 pandemic. *Child Abuse & Neglect*, 116(2), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.chiabu.2020.104747>
- Bae, Y., Shim, M. & Lee, W. (2021). Schizophrenia Detection Using Machine Learning Approach from Social Media Content. *Sensors*, 21(17), 1-18. <https://doi.org/10.3390/s21175924>
- Bauer, M., Glenn, T., Monteith, S., Bauer, R., Whybrow, P. C., & Geddes, J. (2017). Ethical perspectives on recommending digital technology for patients with mental illness. *International journal of bipolar disorders*, 5(1), 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40345-017-0073-9>
- Calvo, R., Milne, D., Hussain, M., & Christensen, H. (2017). Natural language processing in mental health applications using non-clinical texts. *Natural Language Engineering*, 23(5), 649-685. <https://doi.org/10.1017/S1351324916000383>
- Camacho, J., Moreno, S., Suarez-Obando, F., Puyana, J., & Gómez-Restrepo, C. (2013). El procesamiento de lenguaje natural y su relación con la investigación en salud mental. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, 42(2), 227-233. [https://doi.org/10.1016/S0034-7450\(13\)70011-8](https://doi.org/10.1016/S0034-7450(13)70011-8)
- Centola, D. (2010). The spread of behavior in an online social network experiment. *Science*, 329(5996), 1194-1197. <https://doi.org/10.1126/science.1185231>
- Chadha, A., & Kaushik, B. (2022). A Hybrid Deep Learning Model Using Grid Search and Cross-Validation for Effective Classification and Prediction of Suicidal Ideation from Social Network Data. *New Generation Computing*, 40(4), 889-914. <https://doi.org/10.1007/s00354-022-00191-1>
- Chancellor, S., & De Choudhury, M. (2020). Methods in predictive techniques for mental health status on social media: a critical review. *NPJ digital medicine*, 3, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41746-020-0233-7>
- Chanda, K., Roy, S., Mondal, H., & Bose, R. (2022). To Judge Depression and Mental Illness on Social Media Using Twitter. *Universal Journal of Public Health*, 10(1), 116-129. <https://doi.org/10.13189/ujph.2022.100113>
- Chatrinan, K., Kangpanich, A., Wichit, T., Noraset, T., Tuarob, S., & Tawichsri, T. (2021). Towards Approximating Population-Level Mental Health in Thailand Using Large-Scale Social Media Data. In *International Conference on Asian Digital Libraries*, 13133, 334-343. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91669-5\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91669-5_26)
- Chatterjee, M., Samanta, P., Kumar, P., & Sarkar, D. (2022). Suicide Ideation Detection using Multiple Feature Analysis from Twitter Data. *2022 IEEE Delhi Section Conference, DELCON 2022, February*. <https://doi.org/10.1109/DELCON54057.2022.9753295>
- Chen, Z., Zhang, R., Xu, T., Yang, Y., Wang, J., & Feng, T. (2020). Emotional attitudes towards procrastination in people: A large-scale sentiment-focused crawling analysis. *Computers in Human Behavior*, 110, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106391>
- Chiong, R., Budhi, G., Dhakal, S., & Chiong, F. (2021). A textual-based featuring approach for depression detection using machine learning classifiers and social media texts. *Computers in Biology and Medicine*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104499>
- Cobo, M., Lopez-Herrera, A. Herrera-Viedma, E., & Herrera, F. (2011). Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. *Journal of*

- the American Society for Information Science and Technology*, 62, 1382–1402. <https://doi.org/10.1002/asi.21525>
- Confederación Salud Mental España (2019). La salud mental en cifras. <https://comunicalasaludmental.org/guiadeestilo/la-salud-mental-en-cifras/>
- Coppersmith, G., Leary, R., Crutchley, P., & Fine, A. (2018). Natural language processing of social media as screening for suicide risk. *Biomed Inform Insights*, 10, 1-11 <https://doi.org/10.1177/1178222618792860>
- Crestani, F., Losada, D., & Parapar, J. (Ed.). (2022). *Early Detection of Mental Health Disorders by Social Media Monitoring: The First Five Years of the ERisk Project*. Springer Nature.
- Dos Santos, B., Steiner, M., Fenerich, A., & Lima, R. (2019). Data mining and machine learning techniques applied to public health problems: A bibliometric analysis from 2009 to 2018. *Computers & Industrial Engineering*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106120>
- ElDin, D., Taha, M., & Khalifa, N. (2019). SentiNeural: A Depression Clustering Technique for Egyptian Women Sentiments. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 10(5), 550-555. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0100572>
- Fazekas, B., Megaw, B., Eade, D. & Kronfeld, N. (2021). Insights into the real-life experiences of people living with epilepsy: A qualitative ethnographic study. *Epilepsy & Behavior*, 116, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2020.107729>
- Fernández, R. (2020). Panorama mundial de las redes sociales. Statista. <https://es.statista.com/estudio/32777/panorama-mundial-de-las-redes-sociales-dossier-statista>.
- Ferreira, R., Trifan, A., & Oliveira, J. L. (2022). Early risk detection of mental illnesses using various types of textual features. *CEUR Workshop Proceedings*, 3180, 905–920. <https://ceur-ws.org/Vol-3180/paper-72.pdf>
- Garg, M. (2021). A survey on different dimensions for graphical keyword extraction techniques. *Artificial Intelligence Review*, 54, 4731–4770. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10010-6>
- Gaur, M., et al., (2019). Knowledge-aware assessment of severity of suicide risk for early intervention. *The world wide web conference*, 514-525. <https://doi.org/10.1145/3308558.3313698>
- Glaser, E., Morain, A., Gemmell, J. & Raicu, D. (2020). Comparing automatically extracted topics from online suicidal ideation and the responses they invoke. In *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on Applied Computing*, 1818-1825. <https://doi.org/10.1145/3341105.3373902>
- Gong, Y., Shin, K., & Poellabauer, C. (2018, August). Improving LIWC using soft word matching. In *Proceedings of the 2018 ACM international conference on bioinformatics, computational biology, and health informatics*, 18, 523-523. <https://doi.org/10.1145/3233547.3233632>
- Guntuku, S., et al., (2019). Studying expressions of loneliness in individuals using twitter: an observational study. *BMJ open*, 9(11), 1-8. <http://dx.doi.org/10.1136/bmjopen-2019-030355>
- Harrigian, K., Aguirre, C., & Dredze, M. (2020). On the state of social media data for mental health research. *arXiv preprint, 1*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.05233>
- Hlatshwako, T., Shah, S., Kosana, P., Adebayo, E., Hendriks, J., Larsson, E. C., ... Tucker, J. (2021). Online health survey research during COVID-19. *The Lancet Digital Health*, 3(2), Article e76–e77. [https://doi.org/10.1016/s2589-7500\(21\)00002-9](https://doi.org/10.1016/s2589-7500(21)00002-9)
- Huarcaya-Victoria, J. (2020). Consideraciones sobre la salud mental en la pandemia por COVID 19. *Revista peruana de medicina experimental y salud pública*. 3(2), 327-334. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2020.372.5419>
- Joshi, D., & Patwardhan, M. (2020). An analysis of mental health of social media users using unsupervised approach. *Computers in Human Behavior Reports*, 2, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2020.100036>
- Katchapakirin, K., Wongpatikaseree, K., Yomaboot, P., & Kaewpitakkun, Y. (2018). Facebook social media for depression detection in the Thai community. In *2018 15th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/JCSSE.2018.8457362>
- Kim, J., Lee, J., Park, E., & Han, J. (2020). A deep learning model for detecting mental illness from user content on social media. *Scientific reports*, 10(1), 1-6. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68764-y>
- Koh, J., & Liew, T. (2020). How loneliness is talked about in social media during COVID-19 pandemic: text mining of 4,492 Twitter feeds. *Journal of psychiatric research*. 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2020.11.015>
- Kour, H., & Gupta, M. K. (2022). Depression and Suicide Prediction Using Natural Language Processing and Machine Learning. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 370, 117–128. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-8664-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-16-8664-1_11)
- Kour, H., & Gupta, M. K. (2022). Predicting the language of depression from multivariate twitter data using a feature-rich hybrid deep learning model. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 34(24). <https://doi.org/10.1002/cpe.7224>
- Kumar, A., & Nayar, K. (2021). COVID 19 and its mental health consequences. *Journal of Mental Health*, 30(1), 1-2. <https://doi.org/10.1080/09638237.2020.1757052>
- Kumar, P., Samanta, P., Dutta, S., Chatterjee, M., & Sarkar, D. (2022). Feature Based Depression Detection from Twitter Data Using Machine Learning Techniques. *Journal of Scientific Research*, 66(02), 220–228. <https://doi.org/10.37398/jsr.2022.660229>
- Kumar, S., & Nisha, Z. (2022). Does Social Media Feed Tell about Your Mental State? A Deep Randomised Neural Network Approach. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2022-July*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/IJCNN55064.2022.9892210>
- Lekkas, D., Klein, R., & Jacobson, N. (2021). Predicting acute suicidal ideation on Instagram using ensemble machine learning models. *Internet interventions*, 25, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.invent.2021.100424>
- Li, C., Liu, H., Yin, B., & Yang, J. (2022). Weibo Depression Posts Detection by Natural Language Processing. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 16, 430–437. <https://doi.org/10.54097/hset.v16i.2605>



- Li, Q., Zhao, L., Xue, Y., & Feng, L. (2021). Stress-buffering pattern of positive events on adolescents: An exploratory study based on social networks. *Computers in Human Behavior, 114*, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106565>
- Liu, J., Shi, M., & Jiang, H. (2022). Detecting Suicidal Ideation in Social Media: An Ensemble Method Based on Feature Fusion. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*(13), 8197. <https://doi.org/10.3390/ijerph19138197>
- López-Belmonte, J., Marín-Marín, J.-A., Soler-Costa, R. & Moreno-Guerrero, A. (2020). Arduino advances in web of science. A scientific mapping of literary production. *IEEE Access, 8*, 128674–128682. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3008572>
- López-Úbeda, P., Plaza-del-Arco, F., Díaz-Galiano, M., Lopez, L., & Martín-Valdivia, M. (2019). Detecting anorexia in Spanish tweets. *Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Natural Language Processing*. 655-663. [https://doi.org/10.26615/978-954-452-056-4\\_077](https://doi.org/10.26615/978-954-452-056-4_077)
- Mac-Ginty, S., Jiménez-Molina, A. & Martínez, V. (2021). Impacto de la pandemia por COVID 19 en la salud mental de estudiantes universitarios de Chile. *Revista Chilena de Psiquiatría y neurología de la infancia y la adolescencia, 32*(1), 23-37. <https://psicologia.udp.cl/cms/wp-content/uploads/2021/04/Rev-SOPNIA-2021-23-37.pdf>
- Marín-Marín, J. A., Moreno-Guerrero, A. J., Dúo-Terrón, P., & López-Belmonte, J. (2021). STEAM in education: a bibliometric analysis of performance and co-words in Web of Science. *International Journal of STEM Education, 8*(1), 1-21. <https://doi.org/10.1186/s40594-021-00296-x>
- Marshall, C., Lanyi, K., Green, R., Wilkins, G. C., Pearson, F., & Craig, D. (2022). Using Natural Language Processing to Explore Mental Health Insights From UK Tweets During the COVID-19 Pandemic: Infodemiology Study. *JMIR Infodemiology, 2*(1), 1–14. <https://doi.org/10.2196/32449>
- Martínez, M. A., Cobo, M. J., Herrera, M., & Herrera-Viedma, E. (2015). Analyzing the scientific evolution of social work using science mapping. *Research on Social Work Practice, 25*(2), 257–277. <https://doi.org/10.1177/1049731514522101>
- Meena, R., & Thulasi Bai, V. (2022). Depression Detection on COVID 19 Tweets Using Chimp Optimization Algorithm. *Intelligent Automation and Soft Computing, 34*(3), 1643–1658. <https://doi.org/10.32604/iasc.2022.025305>
- Mehedy, M., Nanda, U. & Faruqe, O. (2021). Ranking Mental Illness among Social Media Users. *International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/IC4ME253898.2021.9768617>
- Melvin, S., Jamal, A., Hill, K., Wang, W. & Young, S. (2019). Identifying Sleep-Deprived Authors of Tweets: Prospective Study. *JMIR mental health, 6*(12), 1-9. <https://doi.org/10.2196/13076>
- Mendu, S., Baglione, A., Bacc, S., Wu, C., Ng, B., Shaked, A., Clore, G., Boukhechba, M., & Barnes, L. (2020). A framework for understanding the relationship between social media discourse and mental health. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction, 4*(CSCW2), 1-23. <https://doi.org/10.1145/3415215>
- Moessner, M., Feldhege, J., Wolf, M., & Bauer, S. (2018). Analyzing big data in social media: Text and network analyses of an eating disorder forum. *International Journal of Eating Disorders, 51*(7), 656-667. <https://doi.org/10.1002/eat.22878>
- Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG, The PRISMA Group (2009) Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Med* 6(7), Article e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Mori, K., & Haruno, M. (2021). Differential ability of network and natural language information on social media to predict interpersonal and mental health traits. *Journal of personality, 89*(2), 228-243. <https://doi.org/10.1111/jopy.12578>
- Nadeem, A., Naveed, M., Islam Satti, M., Afzal, H., Ahmad, T., & Kim, K. Il. (2022). Depression Detection Based on Hybrid Deep Learning SSCL Framework Using Self-Attention Mechanism: An Application to Social Networking Data. *Sensors, 22*(24), 1–28. <https://doi.org/10.3390/s22249775>
- Nandhini, B., & Sheeba, J. (2015). Online social network bullying detection using intelligence techniques. *Procedia Computer Science, 45*, 485-492. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.085>
- Narynov, S., Mukhtarkhanuly, D., & Omarov, B. (2020). Dataset of depressive posts in Russian language collected from social media. *Data in Brief, 29*, 105195. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105195>
- Nasrullah, S., & Jalali, A. (2022). Detection of Types of Mental Illness through the Social Network Using Ensembled Deep Learning Model. *Computational Intelligence and Neuroscience, 2022*. <https://doi.org/10.1155/2022/9404242>
- Noraset, T., Chatrinan, K., Tawichsri, T., Thaipisutikul, T., & Tuarob, S. (2022). Language-agnostic deep learning framework for automatic monitoring of population-level mental health from social networks. *Journal of Biomedical Informatics, 133*. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2022.104145>
- Ophir, Y., Asterhan, C., & Schwarz, B. (2019). The digital footprints of adolescent depression, social rejection and victimization of bullying on Facebook. *Computers in Human Behavior, 91*, 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.09.025>
- Organización Mundial de la Salud (2020). Día Mundial de la Salud Mental: una oportunidad para impulsar un aumento a gran escala de la inversión en salud mental. <https://www.who.int/es/news/item/27-08-2020-world-mental-health-day-an-opportunity-to-kick-start-a-massive-scale-up-in-investment-in-mental-health#:~:text=La%20salud%20mental%20es%20una,s e%20suicida%20cada%2040%20segundos>
- Organización Mundial de la Salud. (2017). *Depression and Other Common Mental Disorders*. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/254610/WHO-MSD-MER-2017.2-eng.pdf>
- Palmatier, R. W., Houston, M. B., & Hulland, J. (2018). Review articles: Purpose, process, and structure. *Journal*

- of the *Academy of Marketing Science*, 46(1), 1-5. <https://doi.org/10.1007/s11747-017-0563-4>
- Perera, A., & Fernando, P. (2021). Accurate Cyberbullying detection and prevention on social media. *Procedia Computer Science*, 181, 605-611. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.207>
- Perestelo-Pérez, L. (2013). Estándares sobre cómo desarrollar y reportar revisiones sistemáticas en psicología y salud. *Revista Internacional de Psicología Clínica y de la Salud*, 13(1), 49-57. [http://dx.doi.org/10.1016/S1697-2600\(13\)70007-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1697-2600(13)70007-3)
- Preotiuc-Pietro, D., Carpenter, J., Giorgi, S., & Ungar, L. (2016). Studying the Dark Triad of personality through Twitter behavior. In *Proceedings of the 25th ACM international on conference on information and knowledge management*, 761-770. <http://wwwbp.org/papers/darktriad16cikm.pdf>
- Prince, M. C., & Srinivas, L. N. B. (2022). A Review and Design of Depression and Suicide Detection Model Through Social Media Analytics. 443-455. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-5652-1\\_40](https://doi.org/10.1007/978-981-16-5652-1_40)
- Priya, E., Savita, K., & Zaffar, M. (2021). Depression Detection in Tweets from Urban Cities of Malaysia using Deep Learning. *International Conference on Research and Innovation in Information Systems (ICRIIS)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICRIIS53035.2021.9617079>
- Ragheb, W., Aze, J., Bringay, S., & Servajean, M. (2021). Negatively Correlated Noisy Learners for At-risk User Detection on Social Networks: A Study on Depression, Anorexia, Self-harm and Suicide. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 35(1), 770-783 <https://doi.org/10.1109/TKDE.2021.3078898>
- Ramirez-Cifuentes, D., Largeron, C., Tissier, J., Baeza-Yates, R., & Freire, A. (2021). Enhanced Word Embedding Variations for the Detection of Substance Abuse and Mental Health Issues on Social Media Writings. *IEEE Access*, 9, 130449-130471. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3112102>
- Rego, B., Rego, N., & Kunder, M. (2021). Social Media Analysis for Mental Health Evaluation. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 9(4), 1453-1460. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.33962>
- Ren, L., Lin, H., Xu, B., Zhang, S., Yang, L., & Sun, S. (2021). Depression detection on reddit with an emotion-based attention network: algorithm development and validation. *JMIR Medical Informatics*, 9(7), Article e28754. <https://doi.org/10.2196/28754>
- Ricard, B., & Hassanpour, S. (2021). Deep learning for identification of alcohol-related content on social media (Reddit and Twitter): Exploratory analysis of alcohol-related outcomes. *Journal of medical internet research*, 23(9), <https://doi.org/10.2196/27314>
- Sabina, A. Chulvi, B., & Rosso, P. (2021). On the explainability of automatic predictions of mental disorders from social media data. *International Conference on Applications of Natural Language to Information Systems. Lecture Notes in Computer Science*, 12801, 301-314. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-80599-9\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80599-9_27)
- Saini, G., Yadav, N., & Kamath S, S. (2022). Ensemble Neural Models for Depressive Tendency Prediction Based on Social Media Activity of Twitter Users. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 848, 211-226. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-9089-1\\_18](https://doi.org/10.1007/978-981-16-9089-1_18)
- Sarkar, D., Kumar, P., Samanta, P., Dutta, S., & Chatterjee, M. (2022). A Two-Level Multi-Modal Analysis for Depression Detection From Online Social Media. *International Journal of Software Innovation*, 10(1), 1-22. <https://doi.org/10.4018/IJSI.309114>
- Schoene, A. M., Bojanic, L., Nghiem, M. Q., Hunt, I. M., & Ananiadou, S. (2022). Classifying suicide-related content and emotions on Twitter using Graph Convolutional Neural Networks. *IEEE Transactions on Affective Computing*, XX(X), 1-12. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2022.3221683>
- Silveira, B., Couto, A., & Murai, F. (2018). Online social networks in health care: a study of mental disorders on Reddit. *IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence (WI)* 568-573. <https://doi.org/10.1109/WI.2018.00-36>
- Silveira, B., Silva, H., Murai, F., & da Silva, A. (2021). Predicting user emotional tone in mental disorder online communities. *Future Generation Computer Systems*, 125, 641-651. <https://doi.org/10.1016/j.future.2021.07.014>
- Soler-Costa, R., Moreno-Guerrero, A. J., Lopez-Belmonte, J., & Marín-Marín, J. (2021). Co-word analysis and academic performance of the term TPACK in web of science. *Sustainability*, 13(3), 2-20. <https://doi.org/10.3390/su13031481>
- Sun, L., & Luo, Y. (2022). Identification and analysis of depression and suicidal tendency of Sina Weibo users based on machine learning. *Advances in Educational Technology and Psychology*, 6(9), 108-117. <https://doi.org/10.23977/aetp.2022.060916>
- Tan, H., Peng, S., Zhu, C., You, Z., Miao, M., & Kuai, S. (2021). Long-term Effects of the COVID-19 Pandemic on Public Sentiments in Mainland China: Sentiment Analysis of Social Media Posts. *Journal of Medical Internet Research*, 23(8), 1-12, Article e29150. <https://doi.org/10.2196/29150>
- Tejaswini, V., Babu, K., & Sahoo, B. (2022). Depression Detection from Social Media Text Analysis using Natural Language Processing Techniques and Hybrid Deep Learning Model. *ACM Transactions on Asian and Low-Resource Language Information Processing*. <https://doi.org/10.1145/3569580>
- Urban, A. S., Chulvi, B., & Rosso, P. (2021). On the Explainability of Automatic Predictions of Mental Disorders from Social Media Data. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 12801 LNCS*. Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-80599-9\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80599-9_27)
- Urban, C., & Gates, K. (2021). Deep learning: A primer for psychologists. *Psychological Methods*, 26(6), 743-773. <https://doi.org/10.1037/met0000374>
- Viviani, M., Crocamo, C., Mazzola, M., Bartoli, F., Carrà, G., & Pasi, G. (2021). Assessing vulnerability to psychological distress during the COVID-19 pandemic through the analysis of microblogging content. *Future*

## BIOGRAFÍAS

- Generation Computer Systems*, 125, 446-459. <https://doi.org/10.1016/j.future.2021.06.044>
- Wang, Y., Zhao, Y., Zhang, J., Bian, J., & Zhang, R. (2020). Detecting associations between dietary supplement intake and sentiments within mental disorder tweets. *Health informatics journal*, 26(2), 803-815. <https://doi.org/10.1177/1460458219867231>
- Wongkoblapp, A., Vadillo, M. A., & Curcin, V. (2017). Researching mental health disorders in the era of social media: systematic review. *Journal of medical Internet research*, 19(6), 228. <https://www.jmir.org/2017/6/e228/>
- Wongkoblapp, A., Vadillo, M. A., & Curcin, V. (2021). Deep Learning With Anaphora Resolution for the Detection of Tweepers With Depression: Algorithm Development and Validation Study. *JMIR Mental Health*, 8(8), Article e19824. <https://doi.org/10.2196/19824>
- Yang, K., Zhang, T., & Ananiadou, S. (2022). A mental state Knowledge-aware and Contrastive Network for early stress and depression detection on social media. *Information Processing and Management*, 59(4), 102961. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2022.102961>
- Yao, H., Rashidian, S., Dong, X., Duanmu, H., Rosenthal, R. N., & Wang, F. (2020). Detection of suicidality among opioid users on reddit: Machine learning-based approach. *Journal of medical internet research*, 22(11), Article e15293. <https://doi.org/10.2196/15293>
- Zanwar, S., Wiechmann, D., Qiao, Y., & Kerz, E. (2022). *Exploring Hybrid and Ensemble Models for Multiclass Prediction of Mental Health Status on Social Media*. 184-196, <http://arxiv.org/abs/2212.09839>
- Zhang, M., Lu, S., Li, M., Zhai, Q., Zhou, J., Lu, X., Xu, J., Xue, J., & Zhong, N. (2017). SVM classification model in depression recognition based on mutation PSO parameter. *EDP Sciences*, 8(01037), 1-8. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20170801037>
- Zhang, T., Schoene, A., Ji, S., & Ananiadou, S. (2022). Natural language processing applied to mental illness detection: a narrative review. *NPJ digital medicine*, (46), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41746-022-00589-7>
- Zhang, W., Seltzer, T., & Bichard, S. (2013). Two sides of the coin: Assessing the influence of social network site use during the 2012 US presidential campaign. *Social Science Computer Review*, 31(5), 542-551. <https://doi.org/10.1177/0894439313489962>



**Ismael Leonardo Mieles Toloza**, Magíster en psicología y programador, ha trabajado en proyectos desde las neurociencias, neuropsicología y las nuevas tecnologías, orientadas a la investigación en cognición social y la alteración emocional en pacientes con daño cerebral, ha participado como consultor en la propuesta y desarrollo de proyectos sociales en comunidades indígenas con entidades nacionales colombianas, Becario Colciencias 2016 y docente investigador de la facultad de psicología de la UDI.





**Jesús Armando Delgado Meza**, Estudiante de doctorado en Ciencias de la Educación, Magíster en Administración de Empresas, Especialista en Psicología Clínica y Psicólogo. Docente de la Universidad e Investigación y Desarrollo – UDI. Líder del grupo de Investigación UDIPSI de la UDI. Ha participado en proyectos de investigación Minciencias de Colombia y desarrollado investigaciones en áreas sociales, clínicas y educativas de la Psicología, en más de 20 años como profesional.



**Johana Acevedo Suárez**. Magíster en psicología UPB-BGA. Docente en Educación Superior para Pregrado de Psicología y líder de proyectos estratégicos en primera infancia en la Universidad de Santander, Docente Cátedra en la Universidad Pontificia Bolivariana y actualmente Docente Investigadora de la Universidad de Investigación y Desarrollo. Reconocida como docente virtual UDI (2019) y líder de semillero Connecting People UDI (2022). Con experiencia en el área de la Psicología Clínica y de la Salud, dominio de baterías neuropsicológicas y rehabilitación cognitiva.



# Eficiencia de la Iteración de Newton de Orden 3, en la Solución Numérica por el Método de Disparo

Aro Huanacuni, Alex<sup>1,\*</sup>  ; Santander Mamani, Oscar<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Nacional del Altiplano, Departamento de Ciencias Físico Matemáticas, Puno, Perú

## Resumen:

El método de disparo es una técnica iterativa que usa velocidad de disparo para obtener una solución óptima. El propósito de la investigación es verificar la eficacia de las iteraciones de Newton de orden 3 adaptadas y acopladas a RK4, en el método disparo. Se realizó un experimento numérico con ejemplos mediante el método de disparo en las ecuaciones diferenciales ordinarias no lineal de orden 2, y se obtuvo velocidades de disparo y errores en cada iteración. Los resultados obtenidos sobre velocidades finales fueron satisfactorios con las iteraciones NW, NWO3-1, NWO3-2 y NWO3-3 aplicadas al método de disparo y de los cuales, NWO3-2 y NWO3-3 tienen alta precisión en los experimentos realizados.

**Palabras claves:** Eficiencia, Newton Orden 3, Velocidad de disparo, Método de disparo

## Efficiency of Newton's Iteration of Order 3, in the Numerical Solution by the Shooting Method

**Abstract:** The shooting method is an iterative technique that uses shooting speed to obtain an optimal solution. The purpose of the research is to verify the effectiveness of Newton iterations of order 3 adapted and coupled to RK4, in the shooting method. Numerical experiments were performed with examples using the shooting method in nonlinear ordinary differential equations of order 2, and shooting velocities and errors were obtained in each iteration. The results obtained on final velocities were satisfactory with the iterations NW, NWO3-1, NWO3-2 and NWO3-3 applied to the shooting method and of which, NWO3-2 and NWO3-3 have high accuracy in the experiments performed.

**Keywords:** Efficiency, Newton Order 3, Speed of shooting, Method of shooting

### 1. INTRODUCCIÓN

El método de disparo es una técnica utilizada para encontrar soluciones de ecuaciones diferenciales ordinarias con valores en la frontera y se efectúa realizando disparos a ciertas velocidades hasta alcanzar el blanco que se sitúa en la frontera. El problema de valores en la frontera (PVF), estudiado por Bailey & Shampine (1968), está dado de la forma

$$x'' = f(t, x, x'), x(a) = \alpha, x(b) = \beta, t \in (a, b), \quad (1)$$

Este tipo de ecuaciones tiene soluciones analíticas en algunos casos y en otras se hace más tedioso como en el caso no lineal, pero se puede garantizar soluciones únicas implícitas bajo las condiciones suficientes planteadas y demostradas por Schrader (1969), Ha (2001) y Keller (2018). Por su parte, Burden et al. (2017) consideran para análisis del problema (1), el problema de valor inicial (PVI) dada por

$$x'' = f(t, x, x'), x(a, \eta) = \alpha, x'(a, \eta) = \eta, \quad (2)$$

con  $\eta$  velocidad de disparo y  $\eta_0 = (\beta - \alpha)/(b - a)$  velocidad de disparo inicial para la parte numérica. La solución exacta

$x = x(t, \eta)$  de (2) está garantizada por las condiciones mencionadas anteriormente, que son fundamentales para formular la solución numérica del problema (1). En la formulación, la aproximación numérica busca la velocidad de disparo  $\eta$  de mayor precisión, que satisface la ecuación  $x(b, \eta) - \beta = 0$ , y esto garantiza una buena aproximación a la solución exacta de (1) en la frontera  $t = b$ . Para encontrar velocidades se puede utilizar técnicas iterativas como: bisección, secante, punto fijo, Newton y otros. El rendimiento de estos métodos son diferentes, sin embargo la iteración de Newton clásico (NW) es utilizada por muchos investigadores por su rendimiento y ciertas modificaciones como el de Osborne (1969). Para sistema diferencial, Attili & Syam (2008) aplicaron la técnica de descomposición adomiana y NW en ambos casos en el método de disparo y obtuvieron buenos resultados. Las iteraciones de Runge Kutta de orden 4 (RK4) y de NW pueden ser acoplados al método disparo en la solución de diferentes problemas como de Dirichlet, Sturm-Liouville, Robin y rotación del eje motor (Ahsan & Farrukh, 2013; Granas et al., 1979; Liu, 2006; Mataušek, 1974). En los problemas, es difícil obtener en forma explícita la solución del PVF, por lo que se recurre a métodos numéricos como el de Euler, Diferencias finitas, Runge Kutta y entre otros para aproxi-

\*ayaro@unap.edu.pe

Recibido: 30/03/2023

Aceptado: 04/10/2023

Publicado en línea: 09/02/2024

10.33333/tp.vol53n1.07

CC BY 4.0

mar a la solución exacta con alta precisión y también se utiliza para describir el comportamiento cualitativo de ciertos modelos relacionados con las ecuaciones diferenciales. El método RK4, propuesto por Kutta (1901), e iteración de Newton clásico serán aplicados a la ecuación (1), en el estudio conjuntamente con Newton modificadas de orden 3. En la presente investigación, se realizó un experimento numérico con método de disparo utilizando RK4 e iteraciones adaptadas de Newton del mismo orden 3, y es aplicado al PVF no lineal (1) orden 2, con el propósito de determinar la eficiencia de iteraciones adaptadas en la aproximación del PVF. Para obtener resultados numéricos esperados, se utilizó Python 3 por su mayor uso en la actualidad.

## 2. MÉTODOS

En la ecuación (2), se deriva con respecto a  $\eta$  y se evalúa en  $\eta = \eta_k$  con  $(k = 0, \dots, n)$ , se obtiene un nuevo PVI:

$$\frac{\partial x''}{\partial \eta} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{dx}{d\eta} + \frac{\partial f}{\partial x'} \frac{dx'}{d\eta}, \frac{\partial x}{\partial \eta}(a, \eta_k) = 0, \frac{\partial x'}{\partial \eta}(a, \eta_k) = 1, \quad (3)$$

donde  $x'$ , denota la derivada con respecto a  $t$ .

Considerando  $x(t, \eta_k) = u_1(t)$ ,  $x'(t, \eta_k) = u_2(t)$ ,  $\frac{\partial x}{\partial \eta}(t, \eta_k) = v_1(t)$  y  $\frac{\partial x'}{\partial \eta}(t, \eta_k) = v_2(t)$ , en las ecuaciones (2) y (3) se obtiene las siguientes nuevas ecuaciones:

$$\begin{cases} u_1' = u_2, u_1(a) = \alpha, \\ u_2' = f(t, u_1, u_2), u_2(a) = \eta_k \end{cases} \quad (4)$$

y

$$\begin{cases} v_1' = v_2, v_1(a) = 0, \\ v_2' = \frac{\partial f}{\partial u_1}(t, u_1, u_2)v_1 + \frac{\partial f}{\partial u_2}(t, u_1, u_2)v_2, v_2(a) = 1. \end{cases} \quad (5)$$

Para obtener solución numérica  $U_j = (u_1(t_j, \eta_k), u_2(t_j, \eta_k))$ , para  $j \geq 1$ , en tiempo  $t_j$  con velocidad de disparo  $\eta_k$ , se aplicó la tabla moderna de RK4 utilizada por Butcher (1996) al sistema (4), como sigue

$$K_1 = hF(t_{j-1}, U_{j-1}), \quad (6)$$

$$K_2 = hF\left(t_{j-1} + \frac{h}{2}, U_{j-1} + \frac{1}{2}K_1\right), \quad (7)$$

$$K_3 = hF\left(t_{j-1} + \frac{h}{2}, U_{j-1} + \frac{1}{2}K_2\right), \quad (8)$$

$$K_4 = hF(t_{j-1} + h, U_{j-1} + K_3), \quad (9)$$

$$U_j = U_{j-1} + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4), \quad (10)$$

para  $F(t, U) = (u_2, f(t, u_1, u_2))$ ,  $U = (u_1, u_2)$  y  $U_0 = (\alpha, \eta_0)$ . Utilizando  $G(t, V, U) = (v_2, \frac{\partial f}{\partial u_1}(t, u_1, u_2)v_1 + \frac{\partial f}{\partial u_2}(t, u_1, u_2)v_2)$ , con  $V = (v_1, v_2)$  y  $V_0 = (0, 1)$ , se obtiene de forma análoga  $V_j = (v_1(t_j, \eta_k), v_2(t_j, \eta_k))$  por RK4 aplicado a  $G(t, V, U_j)$ .

Los resultados obtenidos por RK4 permite obtener las siguientes aproximaciones  $x(t_j, \eta_k) \approx u_1(t_j, \eta_k)$ ,  $x'(t_j, \eta_k) \approx u_2(t_j, \eta_k)$  y  $\frac{\partial x}{\partial \eta}(t_j, \eta_k) \approx v_1(t_j, \eta_k)$ , y estos son utilizados en NW, para determinar una nueva velocidad de disparo  $s_k$  y reformulando nuevamente las ecuaciones (4) y (5) para  $\eta_k = s_k$ , se obtiene nuevas aproximaciones  $u_1(b, s_k)$  y  $v_1(b, s_k)$  para velocidad de disparo  $s_k$ ,

así sucesivamente hasta lograr aproximación eficiente. Estos valores numéricos obtenidos son asociados a velocidad de disparo  $\eta_k$ , y el siguiente paso es buscar velocidades de disparo por iteraciones adaptadas propuestas en la investigación. A continuación, presentamos iteraciones adaptadas de orden 3, de dos pasos con el propósito de construir  $\eta_1, \dots, \eta_n$ , a partir de  $\eta_0$ .

La iteración Newton orden 3 (NWO3-1), propuesta por Weeraakoon & Fernando (2000), y al sustituir por  $u_1(b, \eta_k)$  y  $u_1(b, s_k)$  (aproximaciones de  $x$  en  $t = b$  asociados a las velocidades  $\eta_k$  y  $s_k$ , respectivamente) y,  $v_1(b, \eta_k)$  y  $v_1(b, s_k)$  (son aproximación a  $\frac{\partial x}{\partial \eta}(b, \eta_k)$  y  $\frac{\partial x}{\partial \eta}(b, s_k)$ , respectivamente) quedan adaptadas de la siguiente manera:

$$s_k = \eta_k - \frac{u_1(b, \eta_k) - \beta}{v_1(b, \eta_k)} \quad (11)$$

$$\eta_{k+1} = \eta_k - 2 \frac{u_1(b, s_k) - \beta}{v_1(b, \eta_k) + v_1(b, s_k)}, k = 0, \dots, n, \quad (12)$$

donde  $s_k$  y  $\eta_{k+1}$  son velocidades de disparo de primer y segundo paso, respectivamente.

La otra perspectiva iteración Newton orden 3 (NWO3-2), dada por Darvishi & Barati (2007), y utilizando las aproximaciones mencionadas en la iteración anterior, tiene la forma adaptada dada por:

$$s_k = \eta_k - \frac{u_1(b, \eta_k) - \beta}{v_1(b, \eta_k)} \quad (13)$$

$$\eta_{k+1} = \eta_k - \frac{u_1(b, s_k) + u_1(b, \eta_k) - 2\beta}{v_1(b, \eta_k)}, k = 0, \dots, n, \quad (14)$$

donde  $s_k$  y  $\eta_{k+1}$  son velocidades de disparo de primer y segundo paso, respectivamente.

Magreñán Ruiz & Argyros (2014) usan la técnica iteración de orden 3 (NWO3-3), y manera similar como los casos anteriores quedan adaptadas las velocidades de disparo de la siguiente manera:

$$s_k = \eta_k - \frac{u_1(b, \eta_k) - \beta}{v_1(b, \eta_{-k})} \quad (15)$$

$$\eta_{k+1} = s_k - \frac{u_1(b, s_k) - \beta}{v_1(b, \eta_k)}, k = 0, \dots, n, \quad (16)$$

donde  $s_k$  y  $\eta_{k+1}$  son velocidades de disparo de primer y segundo paso, respectivamente.

Estas iteraciones son diferentes pero del mismo orden 3, y fueron demostradas con rigurosidad por los autores mencionados y dichas adaptaciones fueron utilizadas para verificar si las velocidades de disparos encontrados son efectivos. Para la presente investigación, se realizó el experimento con las siguientes iteraciones adaptada de NW, NWO3-1, NWO3-2, NWO3-3 y RK4, en la determinación de velocidades de disparo óptimo con la condición de pare  $|u_1(b, \eta_k) - \beta| < tol$ , donde  $tol$  denota la tolerancia, además se pretende estimar los errores de aproximación a la solución exacta. Asimismo, para la implementación del script del método de disparo se utilizó el diagrama de flujo de la Figura 1, los paquetes NumPy (2022) y SymPy (2022), y se realizó en Python 3, con interfaz Jupyter Notebook.

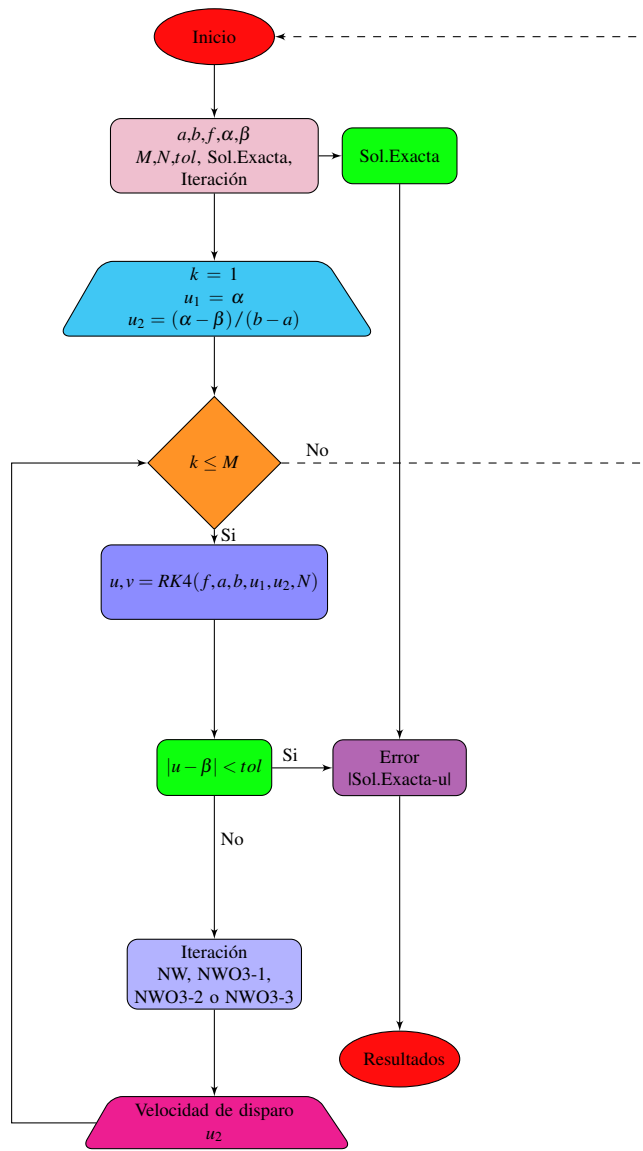


Figura 1. Diagrama de flujo del método de disparo

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El experimento se realizó con la implementación de *class Method\_diaparo()* (ver, apéndices A y B) y los ejemplos:

#### 3.1 Ejemplo 1

Considere el problema de valores en la frontera (Filipov et al., 2017):

$$x'' = -\frac{3x^2 x'}{t}, x(1) = \frac{1}{\sqrt{2}}, x(2) = \frac{2}{\sqrt{5}}, \quad (17)$$

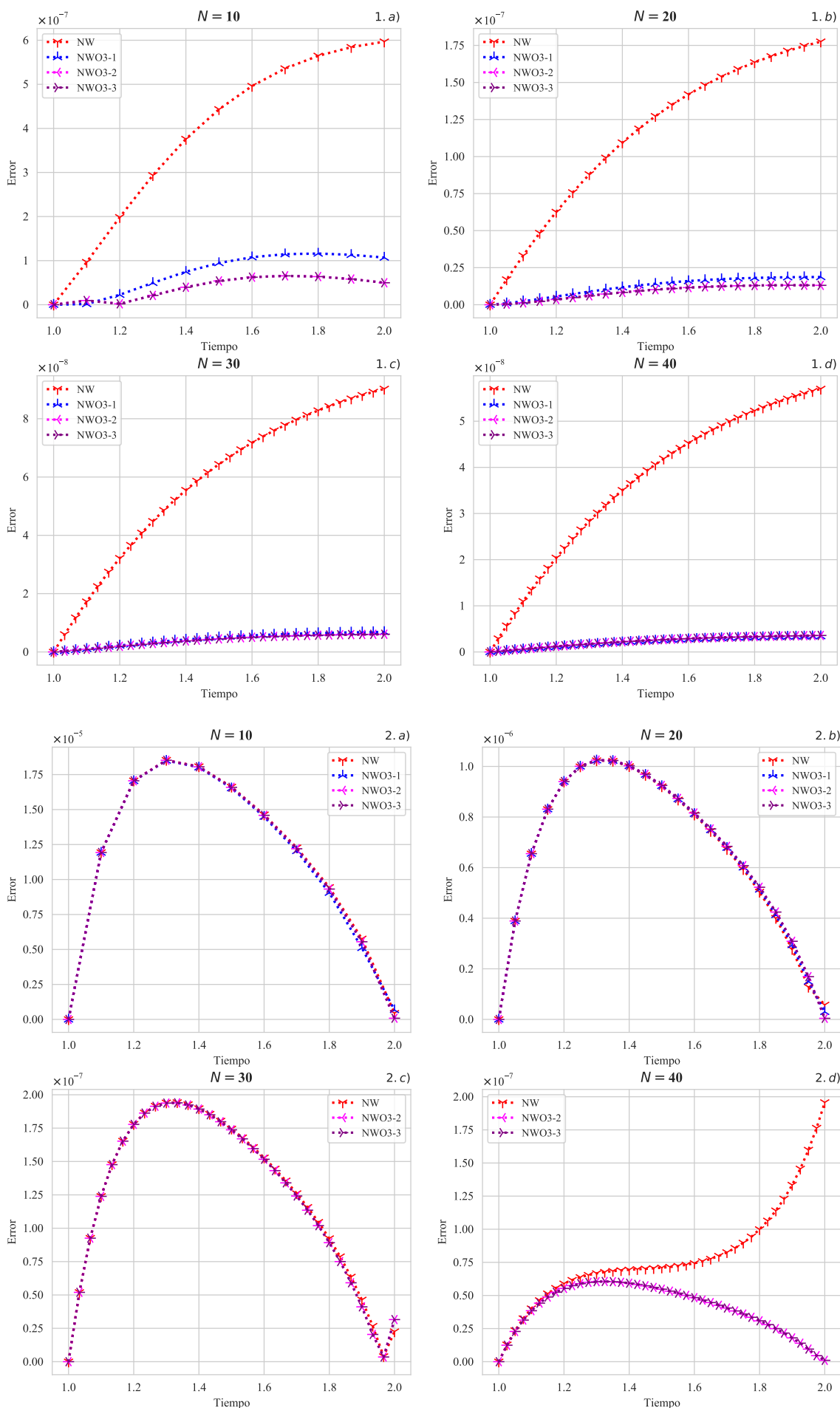
donde  $x(t) = t/\sqrt{t^2 + 1}$ , es solución exacta.

Observe la Tabla 1, los errores de aproximación a la solución exacta en la frontera  $t = \frac{2}{\sqrt{5}}$ , generados a diferentes velocidades obtenidas por iteraciones adaptadas. Las iteraciones NWO3-1, NWO3-2 y NWO3-3 se desempeñan con alta precisión que NW. Además, estas iteraciones requieren un promedio 4 o 3 procesos en la estimación; las velocidades finales obtenidas por iteraciones

NWO3-2 y NWO3-3 tienen excelentes aproximaciones en la frontera que los demás, como se puede ver en la Figura 2, 1.a), 1.b), 1.c) y 1.d).

Tabla 1. Velocidades de disparo determinados por  $|u_1(2, \eta_k) - 2/\sqrt{5}| < 10^{-6}$ , NW, NWO3-1, NWO3-2 y NWO3-3 con velocidad inicial  $\eta_0 = 0.18732041$ , en el Ejemplo 1

| Iteración | N  | k | Velocidad $\eta_k$ | Error $ u_1(2, \eta_k) - 2/\sqrt{5} $ |
|-----------|----|---|--------------------|---------------------------------------|
| NW        | 10 | 0 | 0.18732041         | $8.33042178 \times 10^{-2}$           |
|           |    | 1 | 0.34483077         | $4.17409946 \times 10^{-3}$           |
|           |    | 2 | 0.35343823         | $5.46837987 \times 10^{-5}$           |
|           | 20 | 0 | 0.18732041         | $8.33041975 \times 10^{-2}$           |
|           |    | 1 | 0.34528631         | $3.95582105 \times 10^{-3}$           |
|           |    | 2 | 0.35348789         | $3.12490276 \times 10^{-5}$           |
|           | 30 | 0 | 0.18732041         | $8.33041964 \times 10^{-2}$           |
|           |    | 1 | 0.34544693         | $3.87879728 \times 10^{-3}$           |
|           |    | 2 | 0.35350412         | $2.35151177 \times 10^{-5}$           |
|           | 40 | 0 | 0.18732041         | $8.33041962 \times 10^{-2}$           |
|           |    | 1 | 0.34552881         | $3.83953140 \times 10^{-3}$           |
|           |    | 2 | 0.35351217         | $1.96784501 \times 10^{-5}$           |
| NWO3-1    | 10 | 0 | 0.18732041         | $8.33042178 \times 10^{-2}$           |
|           |    | 1 | 0.35165765         | $9.05161726 \times 10^{-4}$           |
|           |    | 2 | 0.35353219         | $9.82880362 \times 10^{-6}$           |
|           | 20 | 0 | 0.18732041         | $8.33041975 \times 10^{-2}$           |
|           |    | 1 | 0.35233152         | $5.83463330 \times 10^{-4}$           |
|           |    | 2 | 0.35354644         | $3.29959069 \times 10^{-6}$           |
|           | 30 | 0 | 0.18732041         | $8.33041964 \times 10^{-2}$           |
|           |    | 1 | 0.35256914         | $4.69974834 \times 10^{-4}$           |
|           |    | 2 | 0.35354962         | $1.79476060 \times 10^{-6}$           |
|           | 40 | 0 | 0.18732041         | $8.33041962 \times 10^{-2}$           |
|           |    | 1 | 0.35269030         | $4.12107629 \times 10^{-4}$           |
|           |    | 2 | 0.35355090         | $1.18778164 \times 10^{-6}$           |
| NWO3-2    | 10 | 0 | 0.18732041         | $8.33042178 \times 10^{-2}$           |
|           |    | 1 | 0.35272309         | $3.96160193 \times 10^{-4}$           |
|           |    | 2 | 0.35355268         | $4.98226820 \times 10^{-8}$           |
|           | 20 | 0 | 0.18732041         | $8.33041975 \times 10^{-2}$           |
|           |    | 1 | 0.35278755         | $3.65644335 \times 10^{-4}$           |
|           |    | 2 | 0.35355333         | $1.30788557 \times 10^{-8}$           |
|           | 30 | 0 | 0.18732041         | $8.33041964 \times 10^{-2}$           |
|           |    | 1 | 0.35280959         | $3.55132580 \times 10^{-4}$           |
|           |    | 2 | 0.35355337         | $6.07323403 \times 10^{-9}$           |
|           | 40 | 0 | 0.18732041         | $8.33041962 \times 10^{-2}$           |
|           |    | 1 | 0.35282071         | $3.49825478 \times 10^{-4}$           |
|           |    | 2 | 0.35355338         | $3.56956209 \times 10^{-9}$           |
| NWO3-3    | 10 | 0 | 0.18732041         | $8.33042178 \times 10^{-2}$           |
|           |    | 1 | 0.35272309         | $3.96160193 \times 10^{-4}$           |
|           |    | 2 | 0.35355268         | $4.98226818 \times 10^{-8}$           |
|           | 20 | 0 | 0.18732041         | $8.33041975 \times 10^{-2}$           |
|           |    | 1 | 0.35278755         | $3.65644335 \times 10^{-4}$           |
|           |    | 2 | 0.35355333         | $1.30788556 \times 10^{-8}$           |
|           | 30 | 0 | 0.18732041         | $8.33041964 \times 10^{-2}$           |
|           |    | 1 | 0.35280959         | $3.55132580 \times 10^{-4}$           |
|           |    | 2 | 0.35355337         | $6.07323403 \times 10^{-9}$           |
|           | 40 | 0 | 0.18732041         | $8.33041962 \times 10^{-2}$           |
|           |    | 1 | 0.35282071         | $3.49825478 \times 10^{-4}$           |
|           |    | 2 | 0.35355338         | $3.56956176 \times 10^{-9}$           |



**Figura 2.** Errores de aproximación a la solución exacta por iteración NW, NWO3-1, NWO3-2 y NWO3-3 a lo largo del intervalo  $[1,2]$ , para  $N = 10, 20, 30, 40$  y a velocidades finales  $\eta_k$ . 1.a), 1.b), 1.c) y 1.d) son errores para el Ejemplo 1 y 2.a), 2.b), 2.c) y 2.d) son errores para el Ejemplo 2



Las iteraciones utilizadas en el Ejemplo 1, a diferentes pasos se obtuvieron de forma satisfactoria las velocidades de disparo y así como sus aproximaciones a la solución exacta. Estos resultados pueden ser replicados a pasos más refinados.

3.2 Ejemplo 2

Sea el problema de valores en la frontera que considera Ha (2001):

$$x'' = 2x^3 - 6x - 2t^3, x(1) = 2, x(2) = 2.5, \quad (18)$$

cuya solución exacta es  $x(t) = (t^2 + 1)/t$ .

La iteración NWO3-1 no determina velocidades de disparo para 30 y 40 pasos, debido a la divergencia de la velocidad de disparo y los demás, lo cual permitió alcanzar aproximaciones en la frontera con  $t = 2.5$ , ver Tablas 2 y 3.

**Tabla 2.** Velocidades de disparo determinado por  $|u_1(2, \eta_k) - 2.5| < 10^{-6}$ , NW y NWO3-1, iniciando  $\eta_0 = 0.5$  en el Ejemplo 2

| Iteración | N  | k          | Velocidad $\eta_k$ | Error $ u_1(2, \eta_k) - 2.5 $ |
|-----------|----|------------|--------------------|--------------------------------|
| NW        | 10 | 0          | 0.50000000         | $1.57950953 \times 10^2$       |
|           |    | 1          | 0.08341190         | 1.25249309                     |
|           |    | 2          | 0.00439167         | $5.41334520 \times 10^{-2}$    |
|           |    | 3          | -0.00018506        | $2.65300411 \times 10^{-3}$    |
|           |    | 4          | 0.00004277         | $1.47130714 \times 10^{-4}$    |
|           |    | 5          | 0.00003014         | $8.11190472 \times 10^{-6}$    |
|           | 20 | 0          | 0.00003084         | $4.47387389 \times 10^{-7}$    |
|           |    | 1          | 0.12128427         | 2.03652136                     |
|           |    | 2          | 0.02204041         | $2.85075996 \times 10^{-1}$    |
|           |    | 3          | 0.00021781         | $2.65655168 \times 10^{-3}$    |
|           |    | 4          | -0.00000378        | $7.34036004 \times 10^{-5}$    |
|           |    | 5          | 0.00000234         | $2.05706002 \times 10^{-6}$    |
|           | 30 | 6          | 0.00000217         | $5.76246051 \times 10^{-8}$    |
|           |    | 0          | 0.50000000         | $4.58868564 \times 10^4$       |
|           |    | 1          | -0.23664092        | 1.93721273                     |
|           |    | 2          | 0.10392841         | 1.65854857                     |
|           |    | 3          | 0.01839778         | $2.36033621 \times 10^{-1}$    |
|           |    | 4          | 0.00028657         | $3.52587048 \times 10^{-3}$    |
|           | 40 | 5          | -0.00000477        | $6.41937569 \times 10^{-5}$    |
|           |    | 6          | 0.00000055         | $1.20428081 \times 10^{-6}$    |
|           |    | 7          | 0.00000045         | $2.25802430 \times 10^{-8}$    |
|           |    | 0          | 0.50000000         | $6.93565868 \times 10^6$       |
|           |    | 1          | -3.40338089        | 7.90252662                     |
|           |    | 2          | 0.01104305         | $1.39350371 \times 10^{-1}$    |
| NWO3-1    | 10 | 3          | 0.00008111         | $9.97339394 \times 10^{-4}$    |
|           |    | 4          | -0.00000098        | $1.38920473 \times 10^{-5}$    |
|           |    | 5          | 0.00000016         | $1.95747490 \times 10^{-7}$    |
|           |    | 0          | 0.50000000         | $1.57950953 \times 10^2$       |
|           |    | 1          | -0.29974344        | 2.25670816                     |
|           |    | 2          | -0.11589228        | 1.14144361                     |
|           | 20 | 3          | -0.00628252        | $7.65838082 \times 10^{-2}$    |
|           |    | 4          | 0.00035463         | $3.98459836 \times 10^{-3}$    |
|           |    | 5          | 0.00001288         | $2.20355096 \times 10^{-4}$    |
|           |    | 6          | 0.00003179         | $1.21509639 \times 10^{-5}$    |
|           |    | 7          | 0.00003075         | $6.70143617 \times 10^{-7}$    |
|           |    | 0          | 0.50000000         | $1.77913305 \times 10^3$       |
|           | 30 | 1          | -0.25413734        | 2.03121130                     |
|           |    | 2          | -0.09285544        | $9.52524058 \times 10^{-1}$    |
|           |    | 3          | -0.00411759        | $5.02800912 \times 10^{-2}$    |
|           |    | 4          | 0.00011184         | $1.35072947 \times 10^{-3}$    |
|           |    | 5          | -0.00000090        | $3.78763211 \times 10^{-5}$    |
|           |    | 6          | 0.00000226         | $1.06101454 \times 10^{-6}$    |
|           | 40 | 7          | 0.00000218         | $2.97226559 \times 10^{-8}$    |
|           |    | 0          | 0.50000000         | -                              |
|           | 0  | 0.50000000 | -                  | -                              |

**Tabla 3.** Velocidades de disparo determinado por  $|u_1(2, \eta_k) - 2.5| < 10^{-6}$ , NWO3-2 y NWO3-3, iniciando  $\eta_0 = 0.5$  en el Ejemplo 2

| Iteración | N  | k | Velocidad $\eta_k$ | Error $ u_1(2, \eta_k) - 2.5 $ |
|-----------|----|---|--------------------|--------------------------------|
| NWO3-2    | 10 | 0 | 0.50000000         | $1.57950953 \times 10^2$       |
|           |    | 1 | 0.08010851         | 1.19236030                     |
|           |    | 2 | 0.00082903         | $9.83220498 \times 10^{-3}$    |
|           |    | 3 | 0.00003306         | $2.77249143 \times 10^{-5}$    |
|           |    | 4 | 0.00003306         | $8.43114010 \times 10^{-8}$    |
|           |    | 0 | 0.50000000         | $1.77913305 \times 10^3$       |
|           | 20 | 1 | 0.12085076         | 2.02658198                     |
|           |    | 2 | 0.00805983         | $1.00993764 \times 10^{-1}$    |
|           |    | 3 | 0.00000174         | $5.40117776 \times 10^{-6}$    |
|           |    | 4 | 0.00000218         | $4.23893320 \times 10^{-9}$    |
|           |    | 0 | 0.50000000         | $4.58868564 \times 10^4$       |
|           |    | 1 | 0.23660982         | 1.93704166                     |
|           | 30 | 2 | -0.18755890        | 1.64806280                     |
|           |    | 3 | -0.08176044        | $8.55690275 \times 10^{-1}$    |
|           |    | 4 | -0.00576814        | $7.01602412 \times 10^{-2}$    |
|           |    | 5 | -0.00000682        | $8.95503778 \times 10^{-5}$    |
|           |    | 6 | 0.00000044         | $3.15567332 \times 10^{-8}$    |
|           |    | 0 | 0.50000000         | $6.93565868 \times 10^6$       |
|           | 40 | 1 | -3.40337644        | 7.90251538                     |
|           |    | 2 | -0.04921419        | $5.47666655 \times 10^{-1}$    |
|           |    | 3 | -0.00128997        | $1.58436173 \times 10^{-2}$    |
|           |    | 4 | -0.00000027        | $5.13568843 \times 10^{-6}$    |
|           |    | 5 | 0.00000014         | $1.01954090 \times 10^{-9}$    |
|           |    | 0 | 0.50000000         | $1.57950953 \times 10^2$       |
| NWO3-3    | 10 | 1 | 0.08010851         | 1.19236030                     |
|           |    | 2 | 0.00082903         | $9.83220498 \times 10^{-3}$    |
|           |    | 3 | 0.00003306         | $2.77249143 \times 10^{-5}$    |
|           |    | 4 | 0.00003081         | $8.43114001 \times 10^{-8}$    |
|           |    | 0 | 0.50000000         | $1.77913305 \times 10^3$       |
|           |    | 1 | 0.12085076         | 2.02658198                     |
|           | 20 | 2 | 0.00805983         | $1.00993764 \times 10^{-1}$    |
|           |    | 3 | 0.00000174         | $5.40117776 \times 10^{-6}$    |
|           |    | 4 | 0.00000218         | $4.23893320 \times 10^{-9}$    |
|           |    | 0 | 0.50000000         | $4.58868564 \times 10^4$       |
|           |    | 1 | -0.23660982        | 1.93704166                     |
|           |    | 2 | -0.18755890        | 1.64806280                     |
|           | 30 | 3 | -0.08176044        | $8.55690275 \times 10^{-1}$    |
|           |    | 4 | -0.00576814        | $7.01602412 \times 10^{-2}$    |
|           |    | 5 | -0.00000682        | $8.95503778 \times 10^{-5}$    |
|           |    | 6 | 0.00000044         | $3.15567332 \times 10^{-8}$    |
|           |    | 0 | 0.50000000         | $6.93565868 \times 10^6$       |
|           |    | 1 | -3.40337644        | 7.90251538                     |
|           | 40 | 2 | -0.04921419        | $5.47666655 \times 10^{-1}$    |
|           |    | 3 | -0.00128997        | $1.58436173 \times 10^{-2}$    |
|           |    | 4 | -0.00000027        | $5.13568842 \times 10^{-6}$    |
|           |    | 5 | 0.00000014         | $1.01954090 \times 10^{-9}$    |

El error mínimo en la frontera para velocidad estimada es  $1.01954090 \times 10^{-9}$  y se realizó con NWO3-2 y NWO3-3, para  $N = 40$  en el Ejemplo 2 y los demás resultados también son eficaces, pero en menor cantidad de dígitos de precisión ver en las Tablas 2 y 3. Los errores obtenidos por NWO3-1, NWO3-2 y NWO3-3 son menores al resultado obtenido por Ha (2001) y estas iteraciones requieren realizar menor cantidad de operaciones. En la Figura 2, 2.a), 2.b), 2.c) y 2.d), se observan los errores de aproximación a la solución exacta con velocidades estimadas por iteraciones adaptadas. Dentro de los cuales, NWO3-2 y NWO3-3 son precisas en 8 dígitos a la solución exacta en la frontera para  $N = 20$  y  $N = 40$ , y en 7 dígitos para  $N = 10$  y  $N = 30$ . Sin embargo, las iteraciones NWO3-2 y NWO3-3 son excelentes para aproximar para cualquier paso refinado.

#### 4. CONCLUSIONES

Las iteraciones NWO3-2, NWO3-3 y RK4 aplicadas al método de disparo son eficientes para aproximar a las soluciones exactas de problemas de valores en la frontera de orden 2. Además, NWO3-1 y NW desempeñan en forma similar y requieren mayor cantidad de procesos que las iteraciones NWO3-2 y NWO3-3.

#### REFERENCIAS

- Ahsan, M., & Farrukh, S. (2013). A new type of shooting method for nonlinear boundary value problems. *Alexandria Engineering Journal*, 52(4), 801–805. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.07.001>
- Attili, B., & Syam, M. (2008). Efficient shooting method for solving two point boundary value problems. *Chaos, Solitons and Fractals*, 35(5), 895–903. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2006.05.094>
- Bailey, P., & Shampine, L. (1968). On shooting methods for two-point boundary value problems. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 23(2), 235–249. [https://doi.org/10.1016/0022-247X\(68\)90064-4](https://doi.org/10.1016/0022-247X(68)90064-4)
- Burden, R., Faires, J., & Burden, A. (2017). *Análisis Numérico* (10th ed.). Cengage Learning.
- Butcher, J. (1996). History of Runge-Kutta methods. *Applied Numerical Mathematics*, 20(3), 247–260. [https://doi.org/10.1016/0168-9274\(95\)00108-5](https://doi.org/10.1016/0168-9274(95)00108-5)
- Darvishi, M., & Barati, A. (2007). A third-order Newton-type method to solve systems of nonlinear equations. *Applied Mathematics and Computation*, 187(2), 630–635. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.08.080>
- Filipov, S., Gospodinov, I., & Faragó, I. (2017). Shooting-projection method for two-point boundary value problems. *Applied Mathematics Letters*, 72, 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.aml.2017.04.002>
- Granas, A., Guenther, R., & Lee, J. (1979). The Shooting Method for the Numerical Solution of a Class of Nonlinear Boundary Value Problems. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 16(5), 828–836. <https://doi.org/10.1137/0716062>
- Ha, S. N. (2001). A nonlinear shooting method for two-point boundary value problems. *Computers and Mathematics with Applications*, 42(10–11), 1411–1420. [https://doi.org/10.1016/S0898-1221\(01\)00250-4](https://doi.org/10.1016/S0898-1221(01)00250-4)
- Keller, H. B. (2018). *Numerical Methods for Two-Point Boundary-Value Problems*. Dover Publications.
- Kutta, W. (1901). Beitrag zur näherungsweise Integration otaler Differentialgleichungen. *Zeit. Math. Phys.*, 46, 435–453.
- Liu, C. (2006). The Lie-group shooting method for nonlinear two-point boundary value problems exhibiting multiple solutions. *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 13(2), 149–163. <https://doi.org/10.3970/cmcs.2006.013.149>
- Magreñán Ruiz, Á., & Argyros, I. (2014). Two-step Newton methods. *Journal of Complexity*, 30(4), 533–553. <https://doi.org/10.1016/j.jco.2013.10.002>
- Mataušek, M. (1974). Direct shooting method, linearization, and nonlinear algebraic equations. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 14(2), 199–212. <https://doi.org/10.1007/BF00932940>
- NumPy. (2022). *NumPy User Guide v1.3*. <https://numpy.org/doc/1.23/numpy-ref.pdf>
- Osborne, M. (1969). On shooting methods for boundary value problems. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 27(2), 417–433. [https://doi.org/10.1016/0022-247X\(69\)90059-6](https://doi.org/10.1016/0022-247X(69)90059-6)
- Schrader, K. (1969). Existence theorems for second order boundary value problems. *Journal of Differential Equations*, 5(3), 572–584. [https://doi.org/10.1016/0022-0396\(69\)90094-1](https://doi.org/10.1016/0022-0396(69)90094-1)
- SymPy. (2022). *SymPy Documentation*. <https://github.com/sympy/sympy/releases>
- Weerakoon, S., & Fernando, T. (2000). A variant of Newton's method with accelerated third-order convergence. *Applied Mathematics Letters*, 13(8), 87–93. [https://doi.org/10.1016/S0893-9659\(00\)00100-2](https://doi.org/10.1016/S0893-9659(00)00100-2)

#### BIOGRAFÍAS

**Alex Youn, Aro Huanacuni** es Magíster en Matemáticas por la Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ-Brasil) y Licenciado en Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Nacional del Altiplano, Puno. Sus áreas de investigación son la geometría simpléctica, geometría compleja y análisis numérico. Desde 2017, es profesor a tiempo completo en la Universidad Nacional del Altiplano.



**Oscar, Santander Mamani** es Licenciado en Ciencias Físico Matemáticas e Ingeniero de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano, Puno. Cuenta con el grado de Magíster en Informática con mención en Matemática y Simulación Computacional. Sus áreas de investigación son el análisis complejo, métodos numéricos, geomecánica y SSOMA.



**Apéndice A.** Implementación del método de disparo en Python 3:

```

class Method_disparo():
    def __init__(self, f):
        self.f=f
    def RungeKutta_4(self, a, b, u1, u2, N):
        f_np=lambdify([t, [x, x1]], self.f, modules="numpy")
        F=lambda t, u:np.array([u[1], f_np(t, [u[0], u[1]])])
        f_x=lambdify([t, [x, x1]], f.diff(x), modules="numpy")
        f_x1=lambdify([t, [x, x1]], f.diff(x1), modules="numpy")
        G=lambda t, v, u:np.array([v[1], f_x(t, u)*v[0]+f_x1(t, u)*v[1]])
        h=(b-a)/N
        tam=2
        u=np.zeros((tam, N+1))
        v=np.zeros((tam, N+1))
        t1=a+np.arange(N+1)*h
        k=1
        u[0:tam, 0]=np.array([u1, u2])
        v[0:tam, 0]=np.array([0, 1])
        for i in range(N):
            K1=h*F(t1[i], u[0:tam, i])
            K2=h*F(t1[i]+(1/2)*h, u[0:tam, i]+(1/2)*K1)
            K3=h*F(t1[i]+(1/2)*h, u[0:tam, i]+(1/2)*K2)
            K4=h*F(t1[i]+h, u[0:tam, i]+K3)
            u[0:tam, i+1]=u[0:tam, i]+(1/6)*(K1+2*K2+2*K3+K4)
            K_1=h*G(t1[i], v[0:tam, i], u[0:tam, i])
            K_2=h*G(t1[i]+(1/2)*h, v[0:tam, i]+(1/2)*K_1, u[0:tam, i])
            K_3=h*G(t1[i]+(1/2)*h, v[0:tam, i]+(1/2)*K_2, u[0:tam, i])
            K_4=h*G(t1[i]+h, v[0:tam, i]+K_3, u[0:tam, i])
            v[0:tam, i+1]=v[0:tam, i]+(1/6)*(K_1+2*K_2+2*K_3+K_4)
        return t1, u, v
    def Aprox_numeric(self, method, a, b, alpha, beta, N, M, tol):
        k=1
        u1=alpha
        u2=(beta-alpha)/(b-a)
        Vacio=np.empty((0, N+1), float)
        print("="*60)
        while k<=M:
            t1, u, v=Method_disparo.RungeKutta_4(self, a, b, u1, u2, N)
            u_result=np.array([u[0, :]])
            X=np.append(Vacio, u_result, axis=0)
            Vacio=X
            print("Velocidad %s: {:^15.8f}".format(u2)%(k-1))
            if abs(u[0, N]-beta)<=tol:
                return t1, u[0, :]
            break
        else:
            if method=="Newthon":
                u2+=-(u[0, N]-beta)/(v[0, N])
            elif method=="Newthon3_1":
                u11=u2-(u[0, N]-beta)/(v[0, N])
                t1, u10, v10=Method_disparo.RungeKutta_4(self, a, b, u1, u11, N)
                u2=u2-2*(u[0, N]-beta)/(v[0, N]+v10[0, N])
            elif method=="Newthon3_2":
                u11=u2-(u[0, N]-beta)/(v[0, N])
                t1, u10, v10=Method_disparo.RungeKutta_4(self, a, b, u1, u11, N)
                u2=u2-(u[0, N]+u10[0, N]-2*beta)/(v[0, N])
            elif method=="Newthon3_3":

```

```

        u11=u2-(u[0,N]-beta)/(v[0,N])
        t1,u10,v10=Method_disparo.RungeKutta_4(self,a,b,u1,u11,N)
        u2=u11-(u10[0,N]-beta)/(v[0,N])
    k+=1
    else:
        print("No es suficiente",M)
class Error(Method_disparo):
    def __init__(self,f,g):
        super().__init__(f)
        self.g=g
    def error_aprox(self,method,a,b,alpha,beta,N,M,tol):
        t1,x_1=Method_disparo(f).Aprox_numeric(method,a,b,alpha,beta,N,M,tol)
        g_np=lambdify(t,g,modules="numpy")
        x_exact=g_np(t1)
        return t1,abs(x_1-x_exact)

```

## Apéndice B. Declaración de sentencias.

### Ejemplo 1:

```

import numpy as np
from sympy import*
t,x,x1=symbols("t x x1")
f=-3*(x**2)*x1/t
Aprox=Method_disparo(f)
Result1=[Aprox.Aprox_numeric("Newthon",1,2,1/np.sqrt(2),2/np.sqrt(5),i,400,1e-6) for
i in (10,20,30,40)]
Result2=[Aprox.Aprox_numeric("Newthon3_1",1,2,1/np.sqrt(2),2/np.sqrt(5),i,400,1e-6) for
i in (10,20,30,40)]
Result3=[Aprox.Aprox_numeric("Newthon3_2",1,2,1/np.sqrt(2),2/np.sqrt(5),i,400,1e-6) for
i in (10,20,30,40)]
Result4=[Aprox.Aprox_numeric("Newthon3_3",1,2,1/np.sqrt(2),2/np.sqrt(5),i,400,1e-6) for
i in (10,20,30,40)]
Result1, Result2, Result3, Result4
=====
t,x,x1=symbols("t x x1")
f=-3*(x**2)*x1/t
g=t/(t**2+1)**0.5
Result=Error(f,g)
Error1=Result.error_aprox("Newthon",1,2,1/np.sqrt(2),2/np.sqrt(5),i,400,1e-6) for
i in (10,20,30,40) ]
Error2=[Result.error_aprox("Newthon3_1",1,2,1/np.sqrt(2),2/np.sqrt(5),i,400,1e-6) for
i in (10,20,30,40) ]
Error3=[Result.error_aprox("Newthon3_2",1,2,1/np.sqrt(2),2/np.sqrt(5),i,400,1e-6) for
i in (10,20,30,40) ]
Error4=[Result.error_aprox("Newthon3_3",1,2,1/np.sqrt(2),2/np.sqrt(5),i,400,1e-6) for
i in (10,20,30,40) ]
Error1, Error2, Error3, Error4

```

### Ejemplo 2:

```

from sympy import*
import numpy as np
t,x,x1=symbols("t x x1")
f=2*x**3-6*x-2*t**3
Aprox=Method_disparo(f)
Resultado1=[Aprox.Aprox_numeric("Newthon",1,2,2,2.5,k,400e+9,1e-6) for
k in (10,20,30,40)]
Resultado2=[Aprox.Aprox_numeric("Newthon3_1",1,2,2,2.5,k,400e+9,1e-6) for

```

```
k in (10,20)]
Resultado3=[Aprox.Aprox_numeric("Newthon3_2",1,2,2,2.5,k,400,1e-6) for
k in (10,20,30,40)]
Resultado4=[Aprox.Aprox_numeric("Newthon3_3",1,2,2,2.5,k,400,1e-6) for
k in (10,20,30,40)]
=====
g=(t**2+1)/t
Result=Error(f,g)
Errorej1=[Result.error_aprox("Newthon",1,2,2,2.5,k,40000,1e-6) for k in (10,20,30,40)]
Errorej2=[Result.error_aprox("Newthon3_1",1,2,2,2.5,k,40000,1e-6) for k in (10,20)]
Errorej3=[Result.error_aprox("Newthon3_2",1,2,2,2.5,k,40000,1e-6) for k in (10,20,30,40)]
Errorej4=[Result.error_aprox("Newthon3_3",1,2,2,2.5,k,40000,1e-6) for k in (10,20,30,40)]
Errorej1,Errorej2,Errorej3, Errorej4
```



# Evaluación del Desempeño Sísmico de un Sistema Dual de Hormigón Armado con Diferentes Niveles de Irregularidad Torsional

Ulcuango, David<sup>1,\*</sup> ; Haro, Ana Gabriela<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Programa de Maestría de Investigación en Ingeniería Civil mención Estructuras, Sangolquí, Ecuador

<sup>2</sup>Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción, Sangolquí, Ecuador

**Resumen:** En el presente estudio, se analiza el desempeño sísmico de un sistema dual de hormigón armado (pórticos y muros especiales) con diferentes niveles de irregularidad torsional. Se plantean tres arquetipos, cada uno con un nivel de irregularidad torsional distinto (IT 1.0, IT 1.2 e IT 1.4) con la finalidad de evaluar el efecto de la irregularidad torsional en el desempeño sísmico. Los elementos estructurales de los arquetipos cumplen con el diseño sismorresistente. Además, se tomó en cuenta los factores de sobre-resistencia y amplificación dinámica para determinar el corte de diseño en los muros estructurales. Se realizaron análisis estático y dinámicos no lineales para cuantificar las respuestas globales y locales de cada uno de los modelos. Los modelos analíticos de muros estructurales son calibrados en función de los datos obtenidos en ensayos experimentales existentes, de esta manera se valida los elementos tipo fibra (infrmFB) usados y los parámetros de los modelos constitutivos de los materiales. Se realizan análisis dinámicos incrementales (IDA) para cada uno de los arquetipos con los once registros sísmicos seleccionados de la base del PEER. Las curvas IDA son desarrolladas con dos parámetros de demanda ingenieril: derivas de piso y deformaciones unitarias. Finalmente, se elaboran las curvas de fragilidad para los niveles de desempeño de ocupación inmediata, seguridad de vida y prevención de colapso, y se determinan los coeficientes de margen con la finalidad de cuantificar las probabilidades de alcanzar los niveles de desempeño mencionados.

**Palabras clave:** irregularidad torsional, IDA, curvas de fragilidad, niveles de desempeño, coeficientes de margen

## Evaluation of the Seismic Performance of a Dual Reinforced Concrete System with Different Levels of Torsional Irregularity

**Abstract:** This research evaluates the seismic performance of a dual reinforced concrete system with different levels of torsional irregularity. Three archetypes are proposed, each of them with a different level of torsional irregularity (IT 1.0, IT 1.2 and IT 1.4) in order to evaluate the effect of torsional irregularity on seismic performance. The structural elements of the archetypes comply with the seismic design. In addition, the factors of overstrength and dynamic amplification were considered to determine the design shear force in the structural walls. Linear static and nonlinear dynamic analysis were performed to quantify the global and local responses of each of the models. The analytical models of structural walls are calibrated based on the data of existing experimental tests, thus validating the fiber-type elements (infrmFB) used and the parameters of the constitutive models of the materials. Incremental dynamic analysis (IDA) is performed for each of the archetypes with the eleven seismic records selected from the PEER database. IDA curves are developed with two engineering demand parameters: story drifts and strains. Finally, the fragility curves are elaborated for the immediate occupancy, life safety, and collapse prevention performance levels, and the margin ratio are determined to quantify the probabilities of reaching a certain level of performance.

**Keywords:** torsional irregularity, IDA, fragility curves, performance levels, margin ratio

### 1. INTRODUCCIÓN

El desempeño sísmico de las estructuras puede ser afectado por la presencia de irregularidades en la configuración estructural. En pasados terremotos (Japón, 1995; Chile, 2010; Ecuador,

2016), se ha evidenciado la incidencia de las irregularidades estructurales en el comportamiento sísmico de las estructuras (Aguilar et al., 2016; EERI, 2016; FEMA P-2012, 2018; Páez et al., 2017; Sritharan et al., 2014; Tena, 2010). El FEMA P-2012 (2018) menciona que las irregularidades estructurales

\*fdulcuango@espe.edu.ec  
Recibido: 07/06/2023  
Aceptado: 10/04/2023  
Publicado en línea: 09/02/2023  
10.33333/rp.vol53n1.08  
CC 4.0

pueden ser abordadas de tres maneras: removiendo las irregularidades del diseño estructural, tomando en cuenta las irregularidades por medio de un procedimiento analítico o tratando las irregularidades desde un enfoque de diseño. En el caso de este estudio, las irregularidades son abordadas por medio del procedimiento analítico.

Una de las irregularidades estructurales en planta es la irregularidad torsional (IT), la cual se encuentra definida como, la relación entre la deriva máxima de piso ( $\Delta_{max}$ ) incluyendo la torsión accidental y la deriva promedio ( $\Delta_{prom}$ ) de los extremos del mismo entrepiso. Si la relación entre deriva máxima de piso y deriva promedio es mayor o igual a 1,2 se considera que la estructura tiene irregularidad torsional (ver Ecuación (1)) y si la relación entre deriva máxima de piso y deriva promedio es mayor o igual a 1,4 se considera que la estructura tiene irregularidad torsional extrema (ASCE, 2016).

$$\frac{\Delta_{max}}{\Delta_{prom}} \geq 1,2 \quad (1)$$

Los códigos de diseño cumplen la función de dar recomendaciones prescriptivas para procurar un buen comportamiento estructural ante sollicitaciones externas como son los terremotos. Varias normativas (ASCE, 2016; NORMA E030, 2020; NSR-10, 2012) presentan límites y condiciones para el nivel de IT que pueden tener las estructuras dependiendo de la categoría de diseño sísmico o categoría de la edificación. Estas recomendaciones y restricciones se basan en: el tipo de análisis numérico al que debe ser sometida la estructura, aumento en las sollicitaciones de los elementos estructurales por medio del factor de amplificación de la torsión accidental o coeficientes de irregularidad que afecta al porcentaje de corte basal, y limitaciones en el uso de estructuras con niveles de IT mayores a 1,4. La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS, 2015) en su capítulo de diseño sísmico ubica a la irregularidad torsional dentro del grupo de irregularidades horizontales. Debido a que la NEC-SE no tiene límites ni restricciones adicionales cuando las estructuras tienen una relación de irregularidad torsional extrema, se plantea evaluar el desempeño sísmico en función de este parámetro.

Este estudio busca evaluar la variabilidad del desempeño sísmico en función del nivel de irregularidad torsional. Por lo que se plantea el diseño y evaluación de tres arquetipos, cada uno con un nivel de IT diferente (IT 1.0, IT 1.2 e IT 1.4), de 16 pisos de altura conformados por un sistema dual de hormigón armado (pórticos y muros especiales). Se desarrollan modelos no lineales con elementos tipo fibra con una formulación basada en fuerzas (infrmFB) para las secciones de muros estructurales y columnas, mientras que los elementos vigas son representados con elementos de plasticidad concentrada (infrmFBPH). Los análisis no lineales son evaluados ante once registros sísmicos seleccionados de la base de datos PEER. Para elaborar las curvas de fragilidad se toman como parámetro de demanda ingenieril (EDP) las derivas de piso y deformaciones unitarias. Por último, se desarrollan curvas de fragilidad para los niveles de desempeño de ocupación inmediata (OI), seguridad de vida (SV) y prevención de colapso (PC), y se obtienen los coeficientes de

margen (MR) de cada uno de los niveles de desempeño. Los coeficientes de margen representan la razón entre la intensidad mediana de los niveles de desempeño y la aceleración espectral del diseño elástico.

Finalmente, se cuantificó la probabilidad de alcanzar el nivel de desempeño de prevención de colapso ante el sismo máximo considerable para los modelos IT 1.0, IT 1.2 e IT 1.4, siendo esta el 3,54 %, 18,29 % y 31,60 %, respectivamente. Por lo que se concluye que a mayor nivel de irregularidad torsional mayor es la probabilidad de alcanzar el nivel de desempeño de prevención de colapso.

Para investigaciones futuras, se recomienda evaluar la incidencia en el desempeño sísmico en las estructuras con IT 1,4 cuando presentan valores de derivas de piso totales menores al 50 % de la deriva máxima recomendada por el código (NORMA E030, 2020) o se amplifica la fuerza sísmica en las combinaciones de carga por un factor igual a 1,3 para el diseño de los elementos estructurales (ASCE, 2016).

## 2. DEFINICIÓN, ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS ARQUETIPOS

### 2.1 Definición de arquetipos

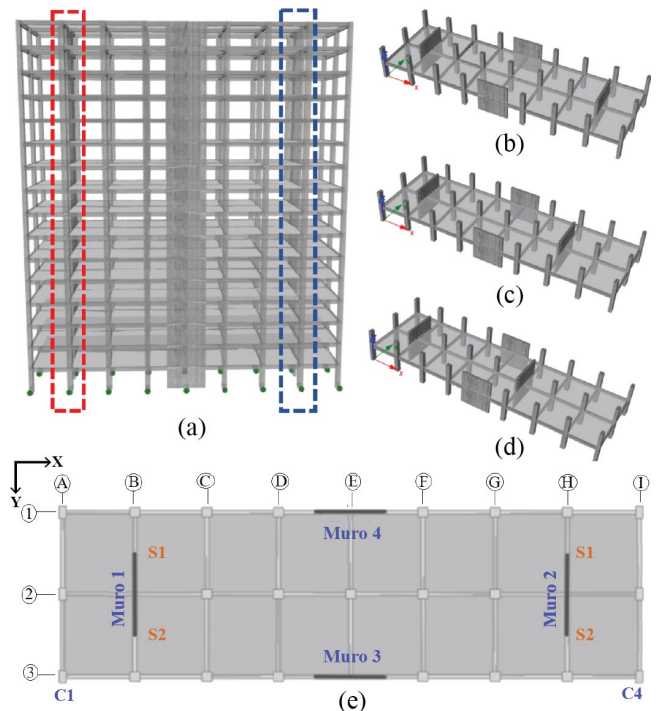
Para medir la variabilidad del desempeño sísmico, se plantean tres arquetipos con diferentes niveles de irregularidad torsional (IT 1.0, IT 1.2 e IT 1.4). En la Figura 1, se presenta el modelo base, el cual consta de 16 pisos y un sistema estructural de muros y pórticos especiales de hormigón armado. Los tres arquetipos tienen similares dimensiones en planta (ancho: 12,0 m y largo: 40,0 m) y un entrepiso constante de 2,9 m (altura total del edificio: 46,4 m). La separación perpendicular entre los pórticos direccionados en el sentido X y Y es 6,0 m y 5,0 m, respectivamente. Como se observa en la Figura 1(a), el muro señalado con un cuadro color azul (muros en sentido Y) se va a mover de posición de derecha a izquierda, y así imponer diferentes niveles de IT. Al muro señalado con un cuadro rojo se le denomina Muro 1 y al muro señalado con un cuadro azul se le denomina Muro 2. Cabe mencionar que se mantienen las mismas dimensiones de los elementos estructurales (vigas, columnas y muros) en los tres modelos.

La Figura 1(b) presenta el esquema del modelo con un nivel de irregularidad torsional igual a 1,0 (Modelo IT 1.0). Las Figura 1(c) y Figura 1(d) presentan la configuración estructural de los modelos con irregularidad torsional mayores a 1,2 (Modelo IT 1.2) y 1,4 (Modelo IT 1.4), respectivamente. La Figura 1(e) presenta un esquema en planta de la ubicación de los muros estructurales (Muro 1 y Muro 2), ubicación de las columnas y esquinas de losa (C1 y C4) que sirven de referencia para cuantificar la relación de irregularidad torsional, y los sectores S1 y S2 que son las zonas donde se evaluarán las deformaciones unitarias a compresión y tensión debido a las sollicitaciones sísmicas.

Se comprueba que el modelo IT 1.0 tiene niveles de IT iguales a la unidad en ambos sentidos (X y Y), el modelo IT 1.2 presenta niveles de IT de 1,0 (sentido X) y 1,37 (sentido Y), y el modelo IT 1.4 tiene niveles de IT de 1,0 (sentido X) y 1,6



(sentido Y). Se observa que la relación de irregularidad torsional se mantiene constante ( $IT = 1,0$ ) en el sentido X, mientras que en el sentido Y se presenta 3 diferentes niveles de irregularidad torsional debido al cambio de ubicación del Muro 2.



**Figura 1.** Configuración de los arquetipos analizados: (a) esquema general del modelo 3D, (b) modelo IT 1.0, (c) modelo IT 1.2, (d) modelo IT 1.4 y (e) vista en planta y visualización de los sectores S1 y S2

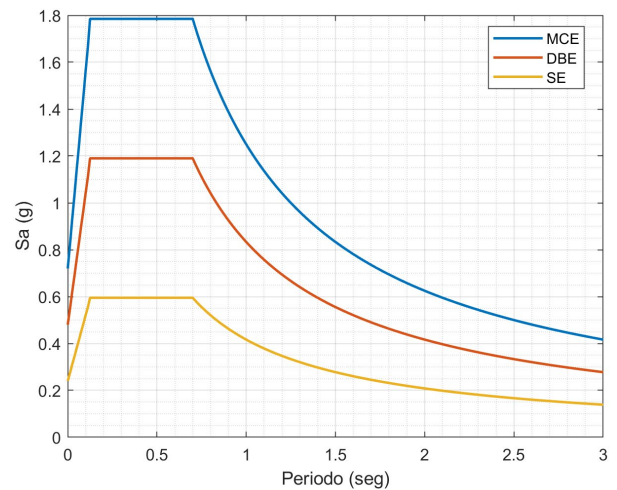
## 2.2 Análisis y diseño de los arquetipos

A continuación, se presenta el procedimiento de diseño de los tres arquetipos seleccionados. El espectro elástico de diseño fue determinado con los coeficientes y parámetros que estipula la NEC (2015). Los tres arquetipos se encuentran ubicados en la ciudad de Quito sobre un suelo tipo D. En la Figura 2, se grafica el espectro elástico de diseño (DBE; 10 % de probabilidad de excedencia en 50 años), el espectro del sismo máximo considerable (MCE; 2 % de probabilidad de excedencia en 50 años) y el espectro del sismo de servicio (SE; 50 % de probabilidad de excedencia en 50 años). Los espectros MCE y SE fueron determinados de manera aproximada al multiplicar el espectro DBE por 1,5 y 0,5, respectivamente (Cagua, 2022).

El factor de importancia es 1,0, y el tipo de uso es residencial para todos los arquetipos. El valor de la sobrecarga es 29,24 MPa y 19,61 MPa para carga muerta y viva, respectivamente. El valor del esfuerzo de compresión del concreto es 27,45 MPa y el esfuerzo de fluencia del acero es 411,88 MPa. El valor del módulo de elasticidad del hormigón es igual a 24 778,59 MPa (NEC-SE-HM, 2015). Se usaron las combinaciones de carga tal como se especifica en la NEC-SE-CG (2015).

Los elementos estructurales vigas, columnas, muros y losas fueron agrietados por los siguientes coeficientes: 0,5, 0,8, 0,6 y 0,35, respectivamente (NEC-SE-DS, 2015). El factor de reducción de resistencia sísmica ( $R$ ) es 7. Todos los arquetipos

fueron diseñados con un porcentaje de corte basal igual a 9,3 % ( $V = 6\,728,64$  kN). Se verifica que los muros estructurales en ambos sentidos absorben más del 75 % del corte basal. Los muros en sentido X, al no tener un cambio en la irregularidad torsional, mantienen constante el porcentaje de corte basal absorbido por los muros (75,6 %). En el sentido Y, el porcentaje de corte absorbido por los muros estructurales varía, ya que en este sentido los niveles de irregularidad torsional también varían ( $IT\ 1.0: 77\%$ ,  $IT\ 1.2: 76,6\%$  e  $IT\ 1.4: 74,6\%$ ). Todos los arquetipos cumplen con el límite de deriva permisible del 2,0 %.



**Figura 2.** Espectros elásticos según NEC-SE-DS. Sismo máximo considerado (MCE), sismo de diseño (DBE) y sismo de servicio (SE)

El diseño estructural fue elaborado con las recomendaciones del ACI 318-19 (2019) y NEC-SE-HM (2015). Los refuerzos longitudinales de columnas fueron obtenidos ante las solicitaciones de flexo – compresión, por lo que fue necesario revisar los diagramas de interacción (axial - momento) para verificar su cumplimiento. El diseño a corte de las columnas se lo realizó con los criterios de diseño por capacidad en donde se involucran los momentos máximos probables de las columnas para poder obtener el corte de diseño (ACI 318-19, 18.7.6.1.1). Los espaciamientos de estribos y chequeo de confinamiento en columnas fueron revisados con ACI 318-19, 18.7.5. El diseño a corte de vigas se lo realizó con los criterios de diseño por capacidad en donde se involucran los momentos máximos probables en vigas para poder obtener el corte de diseño (ACI 318-19, 18.6.5.1). Los espaciamientos de estribos se especificaron acorde a ACI 318-19, 18.6.4.

Los aceros longitudinales del alma y cabezales de los muros estructurales fueron obtenidos con el diseño a flexo – compresión. La longitud de los elementos de borde se obtuvo con las expresiones mencionadas en el ACI 318-19, 18.10.6.2 y NEC-SE-HM, 6.1.5.C, las cuales involucran el cálculo del eje neutro ( $c$ ) al presentarse una deformación unitaria igual a 0,003 en el extremo del muro que se encuentra a compresión. Los elementos de borde o cabezales cumplen con las exigencias de confinamiento mencionadas en ACI 318-19, 18.7.5. Para el diseño a corte de los muros estructurales se consideró el factor de sobre-resistencia ( $\Omega_v$ ) y el factor de amplificación dinámica de corte ( $\omega_v$ ). Al determinar cada uno de los coeficientes y tomando en cuenta el límite establecido en el ACI 318-19, 18.10.3.1, las solicitaciones a corte en todos

los muros fueron amplificados por un factor igual a 3. Finalmente, se verificó el chequeo de la conexión viga-columna especificado en el ACI 318-19, 18.7.3. Esta recomendación exige que la sumatoria de momentos nominales de las columnas deben ser 1,2 veces mayor a la sumatoria de los momentos nominales de vigas.

En la Tabla 1 (Ver Anexo), se presentan las secciones finales de columnas y muros estructurales de los tres arquetipos y sus respectivos refuerzos longitudinales. Los pórticos exteriores (Eje A y Eje I) de los tres arquetipos tienen columnas tipo C10. Las columnas de los ejes B y H tienen secciones tipo C3 en el modelo IT 1.0. Las columnas del eje B tienen secciones tipo C2 y las columnas del eje G tienen secciones tipo C3 en el modelo IT 1.2. Las columnas del eje B y F tienen secciones tipo C3 en el modelo IT 1.4. El resto de las columnas tienen una sección tipo C1. En todos los arquetipos, los muros estructurales direccionados en el eje Y (Muro 1 y Muro 2) tienen una longitud (L) de 6,0 m y un espesor (e) de 0,35 m. Los muros direccionados en el eje X tienen una longitud de 5,0 m y un espesor de 0,35 m. las longitudes de los cabezales (Lc) o elementos de borde varían entre 1,20 m y 0,85 m, dependiendo de la ubicación en altura del muro. Los aceros horizontales de los Muro 1, Muro 3 y Muro 4, en los cuatro primeros pisos de todos los arquetipos, son  $2\Phi 16\text{mm} @ 100\text{mm}$ . El refuerzo horizontal del Muro 2 del modelo IT 1.0 es  $2\Phi 16\text{mm} @ 100\text{mm}$ , mientras que el Muro 2 para los modelos IT 1.2 e IT 1.4 se refuerza con  $2\Phi 18\text{mm} @ 100\text{mm}$ . Las vigas tienen una dimensión de 300 mm x 500 mm en todos los entrepisos de todos los arquetipos.

### 3. CALIBRACIÓN DEL ELEMENTO TIPO FIBRA PARA EL MODELO DE MUROS ESTRUCTURALES

La calibración consiste en estimar la respuesta (global o local) de un elemento estructural mediante el uso de un modelo matemático de elementos finitos y luego comparar los resultados analíticos con resultados experimentales obtenidos en ensayos de laboratorio. Mediante este procedimiento de calibración es posible establecer parámetros para la generación de los modelos constitutivos de los materiales (acero y concreto) y las características que deben tener los elementos modelados (número de fibras, puntos de integración, número de elementos y convergencia). Actualmente para calibrar el modelo matemático de un muro de corte es posible usar dos tipos de modelos: macroscópicos y microscópicos (Almeida et al., 2014; Fischinger et al., 2019; Kolozvari et al., 2018).

Los modelos macroscópicos o macroelementos tienen la característica de tener una mayor robustez en sus formulaciones y los parámetros de ingreso. A pesar de esta característica, los macroelementos han logrado capturar las respuestas globales y locales de elementos estructurales con cierto grado de exactitud. Uno de los beneficios de tener formulaciones más robustas es el menor tiempo de ejecución para realizar las evaluaciones y un menor costo computacional. Los macroelementos están definidos por fibras, resortes o armaduras. Multiple Vertical Line Element Model (MVLEM), Shear-Flexure Interaction Multiple Vertical Line (SFI-MVLEM) y modelos de fibras de

plasticidad distribuida son algunos de los macro modelos existentes en la actualidad.

El modelo MVLEM tiene la característica de que captura la respuesta global del elemento teniendo en cuenta la interacción axial – flexión, pero desacoplando la acción del cortante. El modelo SFI-MVLEM se caracteriza por tener una interacción corte – axial – flexión. El modelo SFI-MVLEM al tener este tipo de interacción se lo conoce como un modelo acoplado y tiene la posibilidad de lograr capturar las deformaciones debido al corte (Kolozvari et al., 2015). Los modelos MVLEM y SFI-MVLEM se encuentran en la plataforma Opensees (McKenna et al., 2000).

Los modelos de plasticidad distribuida (elemento tipo fibra) tienen varias secciones transversales (secciones Gauss), las cuales se encuentran conformadas por n número de fibras. Cada fibra tiene una relación uniaxial esfuerzo – deformación que caracteriza el modelo constitutivo del material (concreto o acero). La respuesta histerética del elemento queda implícitamente representada al incorporar los modelos constitutivos de los materiales en cada una de las fibras (Seismosoft, 2022). Este tipo de elemento logra capturar la interacción axial – momento. El cortante en este elemento se encuentra desacoplado. Adicionalmente, se puede usar dos tipos de formulaciones: formulación basada en fuerzas (FB) y formulación basada en desplazamientos (DB). Gharakhanloo (2014) menciona que una de las principales diferencias entre los elementos con formulación DB y FB es que los elementos con formulación DB requiere un mayor número de elementos para modelar un mismo miembro y lograr obtener respuestas similares a los elementos con formulación FB. Esta diferencia hace que se requiera un mayor tiempo de análisis y uso de memoria del ordenador en el caso de usar elementos con formulación DB. Por este motivo, los elementos estructurales (columnas y muros de corte) fueron modelados con elementos tipo fibra con formulación basada en fuerzas.

Los micro modelos son modelos desarrollados por elementos finitos más refinados. Estos tipos de modelos logran capturar de mejor manera las respuestas estructurales locales y globales obtenidas en ensayos de laboratorio. En los micro modelos es posible considerar las deformaciones por corte, las cuales tienen una gran contribución en el comportamiento de muros bajos. Debido al refinamiento del modelo matemático los micro modelos pueden capturar respuestas más detalladas tales como el aplastamiento del concreto en muros esbeltos ante grandes cargas axiales con elementos de borde con poco confinamiento o la diagonal a tensión en muros donde predomina el corte (Fischinger et al., 2019).

Los muros estructurales se clasifican según su relación de aspecto (altura del muro/longitud del muro o  $h/lw$ ), ya que de esta relación depende el comportamiento del muro estructural. Los muros estructurales esbeltos son los que tienen una relación de aspecto mayor a 3 ( $h/lw > 3$ ) y su comportamiento es gobernado por la flexión. En los muros esbeltos la mayoría de las deformaciones es ocasionada por la flexión. Los muros estructurales con estas características pueden ser analizados con los modelos MVLEM o elementos tipo fibra, ya que las deformaciones que predominan son las de flexión. Los muros

estructurales bajos son los que tienen una relación de aspecto menor a 1 ( $h/l_w < 1$ ) y su comportamiento es gobernado por el corte. En el caso de este tipo de muros las deformaciones por cortante son representativas por lo que las deformaciones totales del muro son limitadas por las deformaciones a corte. Este tipo de muros estructurales pueden ser analizados por medio del modelo SFI-MVLEM, ya que este modelo matemático incorpora la interacción corte – axial – flexión. Dado que los muros estructurales usados en los tres arquetipos tienen una relación de aspecto mayor a 3, se analiza el muro RW2 presentado en el estudio de Thomsen y Wallace (2004) para la calibración del modelo matemático.

### 3.1 Ensayo experimental en muros

El muro RW2 se encuentra en el estudio y ensayo experimental realizado por Thomsen y Wallace (2004). El muro RW2 tiene una relación de aspecto igual a 3 por lo que el comportamiento predominante será la flexión. Las dimensiones del muro RW2 son: 1 219 mm, 102 mm y 3 658 mm (longitud, espesor y altura, respectivamente). El espécimen fue sometido a desplazamientos laterales cíclicos por medio de un actuador hidráulico horizontal. Los patrones de desplazamientos laterales pueden ser revisados en el estudio realizado por Orakcal y Wallace (2006). Adicionalmente, se aplicó una carga axial ( $P = 0,007 A_g f'_c$ , donde  $A_g$  es el área bruta de la sección transversal y  $f'_c$  es el esfuerzo a compresión del concreto) en la parte superior del muro, la cual fue constante en todo el ensayo. El esfuerzo de compresión del concreto al momento del ensayo presentó un rango entre 28,7 MPa a 58,4 MPa y un esfuerzo de compresión promedio de 34 MPa. El refuerzo longitudinal del muro tenía varillas No. 2 ( $32,17 \text{ mm}^2$ ) para el alma del muro y No. 3 ( $70,88 \text{ mm}^2$ ) para el sector de los cabezales. El refuerzo transversal del alma del muro tenía un diámetro de No. 2 ( $32,17 \text{ mm}^2$ ) y 3/16 in ( $17,81 \text{ mm}^2$ ) para el sector de los cabezales.

### 3.2 Modelo matemático del muro experimental

El muro estructural RW2 se modeló en SeismoStruct con elementos inelásticos de pórtico con formulación basada en fuerzas (infrmFB). El elemento infrmFB está conformado por 5 secciones de integración y 500 fibras en sus secciones transversales. La base del muro se encuentra empotrada y en la parte superior de muro se aplica una carga axial constante igual a  $0,007 A_g f'_c$ .

Para representar el concreto se usó el modelo “con\_ma”, el cual usa las reglas constitutivas propuesta por Mander et al. (1988) y las leyes del comportamiento no lineal cíclico propuestas por Martínez-Rueda y Elnashai (1997). Para los valores de esfuerzo de compresión, esfuerzo de tensión y módulo de elasticidad se tomó como referencia los parámetros recomendados por Orakcal y Wallace (2006) (Ver Anexo, Tabla 2).

El acero de refuerzo fue representado por el modelo de acero “stl\_mp”, el cual usa la relación esfuerzo – deformación propuesta por Menegotto-Pinto (1973) y las leyes de endurecimiento isotrópico propuestas por Filippou et al. (1983). Para el valor del esfuerzo de fluencia se tomó como

referencia los valores presentados en Echeverría-Landeta et al. (2022) y Orakcal y Wallace (2006); el parámetro de endurecimiento por deformación usado fue 0,03 al tomar como referencia el estudio de Gallardo et al. (2021); el parámetro de forma inicial de la curva de transición (R) es 20 según Echeverría-Landeta et al. (2022) y los valores por defecto que recomienda SeismoStruct (2022); los coeficientes de calibración A1, A2, A3 y A4 fueron tomados de acuerdo a las recomendaciones por defecto que proporciona SeismoStruct (2022) (Ver Anexo, Tabla 2).

### 3.3 Comparación de los resultados del modelo analítico y modelo experimental

En el estudio de Orakcal y Wallace (2006), se detallan los valores de los desplazamientos en el tope del muro durante el ensayo experimental. Adicionalmente, menciona que existen tres tipos de desplazamientos medidos: a) desplazamiento superior aplicado, b) desplazamiento superior con la contribución del movimiento del pedestal restado y c) desplazamiento superior con el movimiento del pedestal y deformaciones de corte restadas. Debido a que el macro modelo usado solo contempla la interacción axial – momento, es importante comparar las respuestas de desplazamiento superior, pero por flexión, tal como lo detalla Orakcal y Wallace (2006). La respuesta del modelo numérico se obtuvo con la ayuda del modelo MVLEM (multiple-vertical-line-element model) que se puede encontrar en la plataforma de OpenSees. Debido a que la respuesta numérica obtenida con el modelo MVLEM tiene una buena aproximación a la respuesta experimental (Orakcal & Wallace, 2006), se procedió a comprar la respuesta analítica obtenida en Opensees con la respuesta analítica con el modelo infrmFB (ver Figura 3). En la Figura 4 se compara las deformaciones unitarias obtenidas en el ensayo experimental (Orakcal & Wallace, 2006; Thomsen & Wallace, 2004) y las deformaciones unitarias obtenidas con el modelo infrmFB.

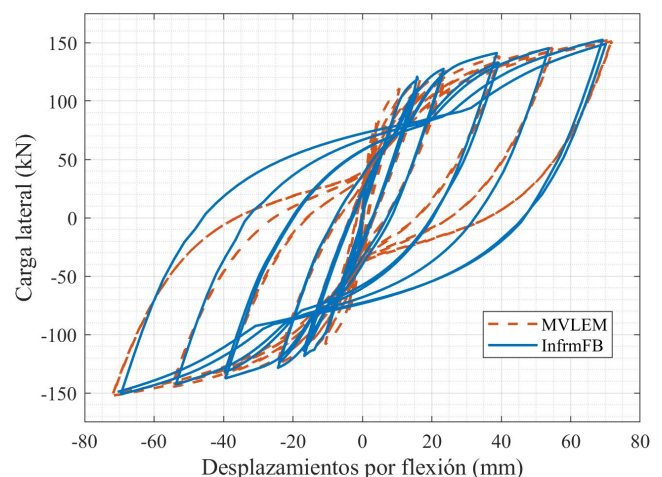


Figura 3. Gráfica desplazamiento superior por flexión vs carga lateral

La Figura 3 muestra como el modelo infrmFB logra capturar valores similares de desplazamiento máximo (70,12 mm) y carga lateral máxima (149 kN) con respecto a los resultados obtenidos con el modelo MVLEM. A pesar de que el modelo infrmFB no logra capturar la disminución de la pendiente de la curva histerética mientras aumentan los ciclos del ensayo,

los valores de deformaciones unitarias a tensión en el extremo del muro son relativamente similares con respecto a los ensayos experimentales, especialmente cuando los valores de derivas de piso se encuentran entre 1,5 % y 2,0 % (ver Figura 4).

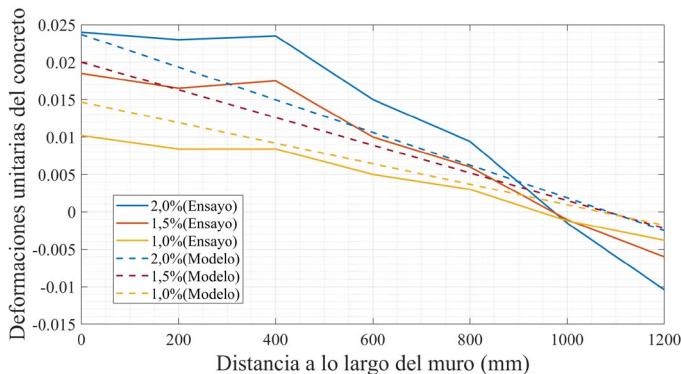


Figura 4. Deformaciones unitarias del ensayo experimental vs deformaciones unitarias del modelo infrmFB

#### 4. MODELO NO LINEAL DE LOS ARQUETIPOS

En función de los parámetros encontrados en la calibración del modelo matemático se procedió a elaborar los modelos no lineales de los tres arquetipos. El valor de esfuerzo a compresión del concreto es 27,45 MPa y el esfuerzo de fluencia del acero es 411,88 MPa. Para el modelo de los muros y columnas se usó elementos inelásticos de pórtico con formulación basada en fuerzas (infrmFB) y para las vigas se usó elementos inelásticos de pórtico de rótula plástica con formulación basada en fuerzas (infrmFBPH). El número de fibras en las secciones transversales usadas son: 131, 400 y 150 para columnas, muros y vigas, respectivamente. Se consideraron tres tipos de materiales: hormigón no confinado (con\_ma), hormigón confinado y acero de refuerzo (stl\_mp).

#### 5. NIVELES DE DESEMPEÑO SÍSMICO

En el presente estudio, se usan los valores de derivas de piso y deformaciones unitarias para poder definir los diferentes niveles de desempeño estructural y estados límite. Adicionalmente, se buscará encontrar una relación entre derivas de piso y deformaciones unitarias para especificar varios niveles de desempeño estructural, y poder comparar ambas metodologías de evaluación por medio de la elaboración de curvas de fragilidad con ambas medidas de daño.

Los niveles de desempeño estructural cuando se toma como parámetro las derivas de piso son: ocupación inmediata (OI; 0,5 %), seguridad de vida (SV; 1%) y prevención de colapso (PC; 2 %), tal como lo detalla FEMA 356 (2000). Debido a que los valores de derivas indicados en el FEMA 356 pretenden ser descripciones cualitativas del comportamiento aproximado de las estructuras que cumplen dichos niveles; y no reemplazan la evaluación local de los límites de deformación de los componentes estructurales (FEMA 356, 2000). También se propone la evaluación del desempeño sísmico por medio de la medición de deformaciones unitarias en los elementos críticos que forman parte del sistema resistente a carga lateral.

Al tomar como parámetro de evaluación las deformaciones unitarias, los estados límite evaluados son: fluencia, servicio y colapso. El valor de deformación unitaria para el estado límite de fluencia es  $\varepsilon_s = f_y/E_s$  y  $\varepsilon_c = 0,002$  (Priestley & Kowalsky, 2000); donde  $\varepsilon_s$  es la deformación unitaria a tensión del acero de refuerzo,  $f_y$  es el esfuerzo de fluencia,  $E_s$  corresponde al módulo de elasticidad del acero de refuerzo y  $\varepsilon_c$  es la deformación unitaria a compresión del concreto. Los valores de deformación unitaria para el estado límite de servicio son:  $\varepsilon_s = 0,015$  y  $\varepsilon_c = 0,004$  para el acero de refuerzo a tensión y el concreto a compresión, respectivamente (Priestley & Kowalsky, 2000). Para definir el colapso se tomó en cuenta los siguientes criterios: (1) inestabilidad lateral dinámica, dicha inestabilidad se produce cuando las cargas verticales generan un efecto desestabilizador (efecto P -  $\Delta$ ) que supera a la resistencia lateral de la estructura, por lo que, la respuesta de desplazamiento aumenta significativamente ante variaciones de intensidades pequeñas (Araya-letelier et al., 2019; Cando, 2020), (2) falla ante cargas axiales, la falla ante cargas axiales se relaciona con el valor de la deriva lateral que puede llegar a alcanzar el edificio, para edificios de mediana altura se establece un valor de deriva límite igual al 5% según las recomendaciones de Gogus y Wallace (2015) y (3) el 50 % de los muros estructurales que conforman el sistema resistente a carga lateral presentan cualquiera de las siguientes fallas: pandeo del acero, fractura del acero, aplastamiento del hormigón (Cando, 2020) e inestabilidad de pandeo fuera del plano (Haro et al., 2019).

La fractura o pandeo del acero de refuerzo se produce cuando la deformación unitaria axial (tensión o compresión) del refuerzo alcanza un valor de 0,05 (ACI-318, 2019; Cando et al., 2020; Dabaghi et al., 2019; Gogus & Wallace, 2015). El aplastamiento en el concreto se produce cuando la deformación unitaria axial del concreto (compresión) supera el límite de aplastamiento según la curva esfuerzo - deformación. El punto límite de aplastamiento (deformación unitaria después de alcanzar el esfuerzo pico del concreto confiando) se produce cuando el concreto alcanza un valor residual de esfuerzo igual al 20 % del esfuerzo pico del concreto confinado (Dabaghi et al., 2019; Gogus & Wallace, 2015).

Haro, Kowalsky & Chai (2019), relacionan las deformaciones debido a cargas en el plano con la inestabilidad de pandeo fuera del plano del muro estructural. En el presente estudio, los valores límite de deformación unitaria a tensión para evitar la inestabilidad de pandeo fuera del plano ( $\varepsilon_{sm}$ ) en el Muro 2 son: 0,056, 0,054 y 0,051 para los modelos IT 1.0, IT 1.2 e IT 1.4, respectivamente. Los valores de  $\varepsilon_{sm}$  fueron calculados con las expresiones detalladas en los estudios de Haro, Kowalsky & Chai (2019) y Sarango, Haro, Acuña & Caiza (2021).

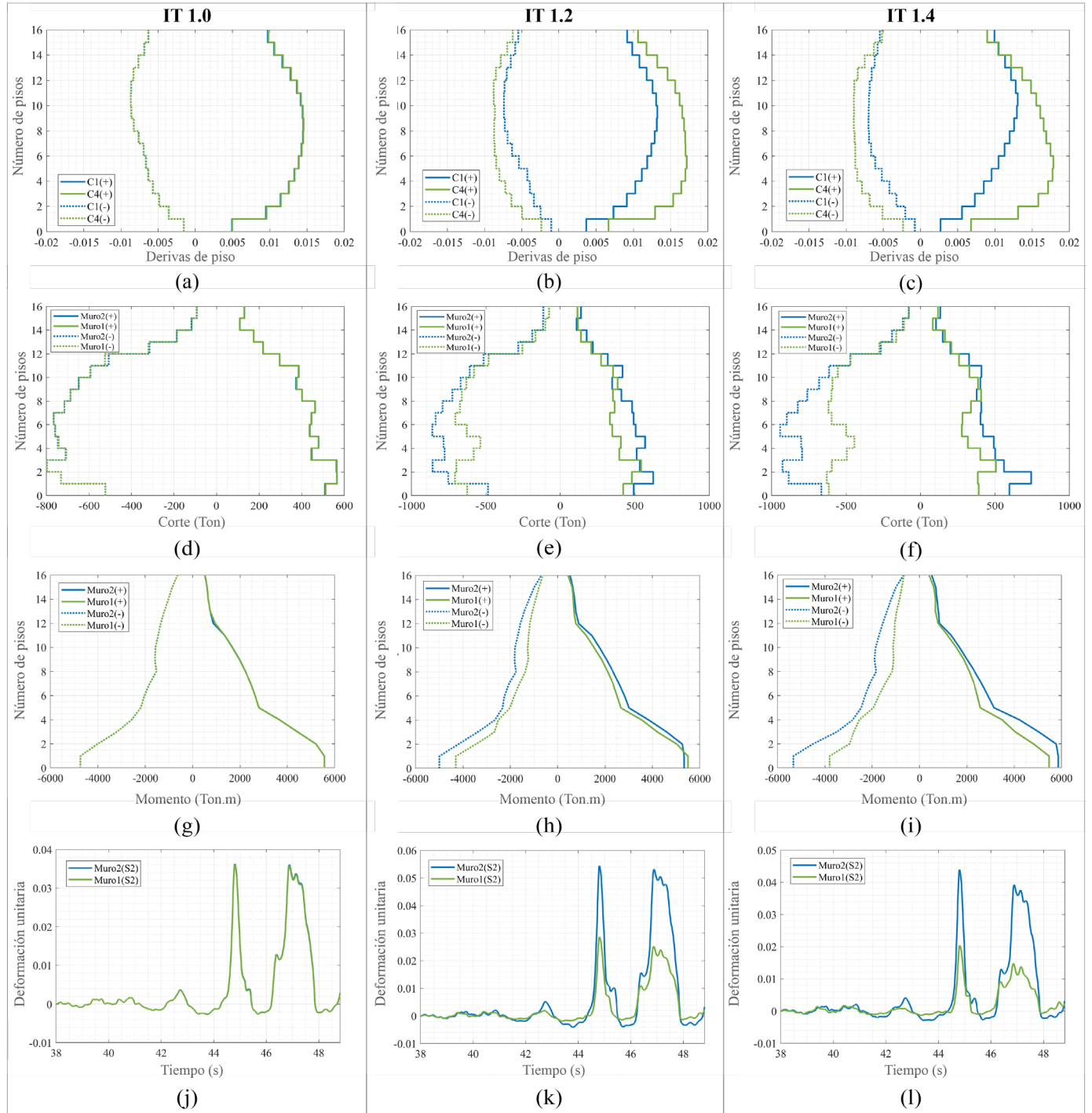
#### 6. SELECCIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS

Los registros sísmicos fueron obtenidos de la base de datos del PEER Ground Motion Database (PEER, 2002), plataforma web que almacena la información de cientos de eventos sísmicos. Se utilizaron los criterios usados en el estudio probabilista de amenaza sísmica de Cagua (2022) para definir

las características de los registros sísmicos seleccionados. Los criterios utilizados para la selección de registros sísmicos son los siguientes: magnitudes mayores a M 5,9, aceleraciones del suelo (PGA) mayores a 0,25 (g), suelo tipo D ( $V_s > 200\text{m/s}$ ) y distancia  $R_{rup} > 5$  (km).

En la Tabla 3 (Ver Anexo), se presenta la lista de los 11 registros seleccionados. Debido a que los análisis dinámicos incrementales tienen una demanda computacional alta, en tiempos de ejecución y memoria computacional, dada la gran

cantidad de análisis no lineales necesarios para crear las curvas IDA, se realizó el procedimiento de Intensidad de Arias con la finalidad de disminuir el tiempo de los registros sísmicos. Se tomó dos tiempos representativos para acortar el registro sísmico. El tiempo inicial corresponde al tiempo en el que la energía del terremoto alcanza un 5 %, y el tiempo final, corresponde al tiempo en el que la energía del terremoto alcanza un 95 %.



**Figura 5.** Respuestas globales y locales de los tres arquetipos ante el registro sísmico de Chi-Chi ( $Sa(T1,5\%) = 0.6g$ ): (a) Derivas de piso (IT 1.0), (b) Derivas de piso (IT 1.2), (c) Derivas de piso (IT 1.4), (d) Distribución de corte (IT 1.0), (e) Distribución de corte (IT 1.2), (f) Distribución de corte (IT 1.4), (g) Distribución de momento (IT 1.0), (h) Distribución de momento (IT 1.2), (i) Distribución de momento (IT 1.4), (j) Distribución de deformaciones unitarias (IT 1.0), (k) Distribución de deformaciones unitarias (IT 1.2), y (l) Distribución de deformaciones unitarias (IT 1.4)

## 7. RESPUESTAS GLOBALES Y LOCALES DEL ANÁLISIS NO LINEAL

Se presentan los resultados del análisis no lineal (tiempo – historia) de los tres arquetipos tomando como amenaza el registro sísmico de Chi-Chi. El registro sísmico se encuentra escalado a un valor de  $S_a$  (T1,5%) igual a 0,6 (g). La Figura 5 presenta una comparación de las solicitaciones globales (derivadas de piso) y locales (corte, momento, deformaciones unitarias) de cada uno de los arquetipos.

En la Figura 5(a), se puede observar que los valores de derivadas de piso del modelo IT 1.0 son similares en ambas esquinas. En la Figura 5(b) y Figura 5(c), se puede verificar que mientras mayor es el nivel de irregularidad torsional mayor es la diferencia relativa de deriva de piso entre C1 y C4. Al comparar las derivadas de piso de la esquina C4 entre los tres arquetipos, se puede observar que el modelo IT 1.4 es el modelo que mayor deriva de piso genera, a pesar de que los tres modelos fueron analizados con la misma amenaza. Las derivadas de piso (piso 1- 6) del modelo IT 1.4 y Modelo IT1.2 son 1,38 y 1,35 veces mayores que las derivadas de piso del Modelo IT 1.0, respectivamente. La Figura 5(d) muestra la distribución del corte, en ambos sentidos, del Muro 1 y Muro 2 del modelo IT 1.0; se puede verificar que se mantiene una relación de igualdad de cortantes entre ambos muros, a lo largo de toda la altura, al tener un modelo con una relación de IT cercana a la unidad.

En la Figura 5(e) y Figura 5(f), se detalla la distribución del corte del Muro 1 y Muro 2 de los modelos con IT 1.2 e IT 1.4, respectivamente; se puede comprobar que mientras mayor es el nivel de irregularidad torsional mayor es la diferencia de cortantes entre muros. Además, el Muro 2 aumenta su nivel de sollicitación con respecto al Muro 1 (el Muro 1 disminuye su sollicitación) mientras aumenta el nivel de irregularidad torsional. El Muro 2 (Piso 6) absorbe 1,89 y 1,37 veces más cortante que el Muro 1 en el modelo con IT 1.4 y IT 1.2, respectivamente. Al comparar la distribución de cortantes entre los tres arquetipos se verifica que el modelo IT 1.4 tiene un perfil de cortantes con mayores sollicitaciones que los modelos IT1.0 e IT 1.2. En la Figura 5(g), se puede verificar que el porcentaje de momento absorbido por el Muro 1 y Muro 2 es igual, a lo largo de toda la altura del edificio, cuando el nivel de irregularidad es 1.0. La Figura 5(h) y Figura 5(i) muestran la variación de momento absorbido por el Muro 1 y Muro 2 cuando el nivel de la IT es 1.2 y 1.4. Se comprueba que el Muro 2 absorbe 1,74 veces más momento que el Muro 1 en el Piso 9 y 1,52 veces más momento que el Muro 1 en el Piso 2, cuando el nivel de irregularidad es IT 1.4. Se verifica que a mayor nivel de irregularidad torsional mayor es el valor de momento absorbido por el Muro 2, mientras disminuye el valor del momento en el Muro 1. Prácticamente en toda la altura del muro existe una variación de momentos dependiendo del nivel de irregularidad torsional, siendo los pisos altos los que mayor variación presentan.

En la Figura 5(j), Figura 5(k) y Figura 5(l), se presentan la distribución de las deformaciones unitarias en los sectores de evaluación S1 y S2 de los diferentes muros estructurales. Los sectores S1 y S2 están conformados por varias fibras de

concreto no confinado, concreto confinado y aceros longitudinales.

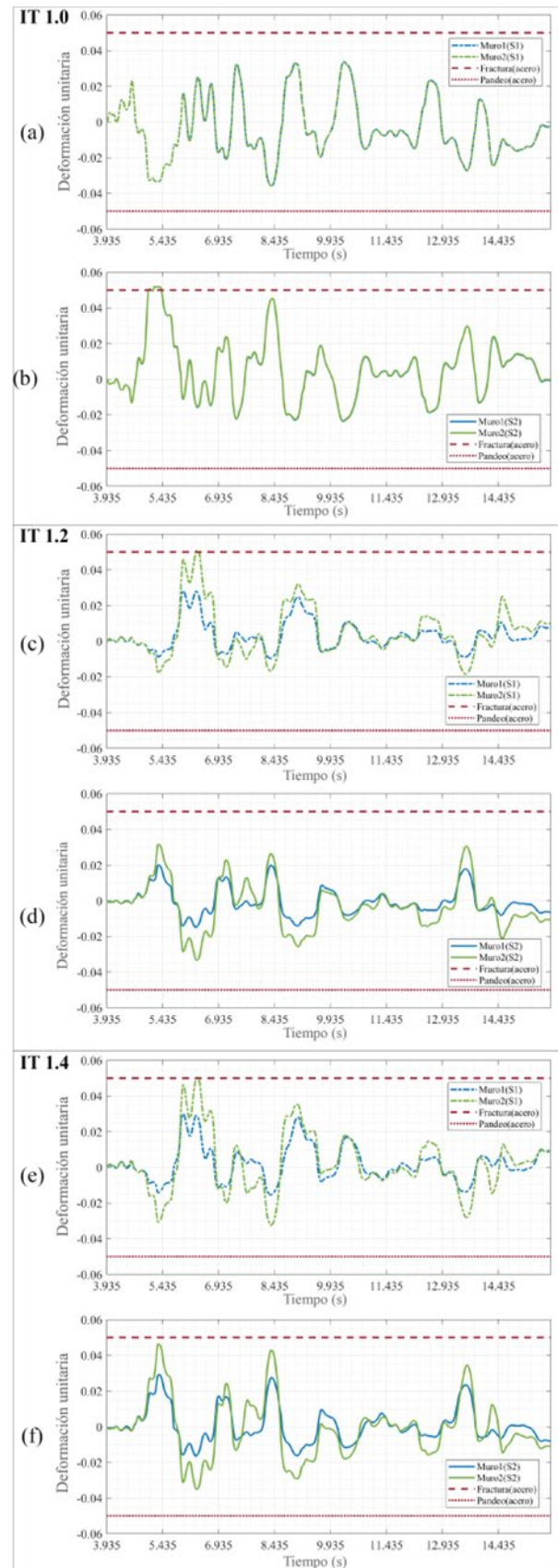


Figura 6. Registros de deformaciones unitarias (Registro de Loma Prieta): (a), (b) modelo IT 1.0, (c), (d) modelo IT 1.2 y (e), (f) modelo IT 1.4

Nuevamente se puede verificar que al tener una relación de IT 1.0 las solicitaciones locales (deformaciones unitarias) se mantienen con la misma distribución en los cuatro sectores de ambos muros estructurales. Las Figura 5(k) y Figura 5(l) muestran cómo se disminuye los valores de deformaciones unitarias en el sector S2 del Muro 1 mientras aumenta el nivel de irregularidad torsional.

## 8. EVALUACIÓN DE LOS ESTADOS LÍMITE EN LOS REGISTROS DE DEFORMACIONES UNITARIAS

En la Figura 6, se presentan algunas respuestas en términos de deformaciones unitarias de la base de los muros estructurales en ambos sectores extremos (S1 y S2), para los modelos con IT 1.0, IT 1.2 e IT 1.4. Se usa el registro de Loma Prieta con diferentes niveles de intensidad del suelo con la finalidad de encontrar los valores de la  $S_a(T1,5\%)$  que provoquen la fluencia, servicio y colapso en alguno de los muros estructurales. Los valores de  $S_a(T1,5\%)$  que alcanzan la fluencia son: 0,1 (g), 0,075 (g) y 0,07 (g) para los modelos con IT 1.0, IT 1.2 e IT 1.4, respectivamente. Los valores de  $S_a(T1,5\%)$  que alcanzan el servicio son: 0,75 (g), 0,44 (g) y 0,35 (g) para los modelos con IT 1.0, IT 1.2 e IT 1.4, respectivamente. Los valores de  $S_a(T1,5\%)$  que alcanzan el colapso son: 3,1 (g), 1,18 (g) y 1,17 (g) para los modelos con IT 1.0, IT 1.2 e IT 1.4, respectivamente.

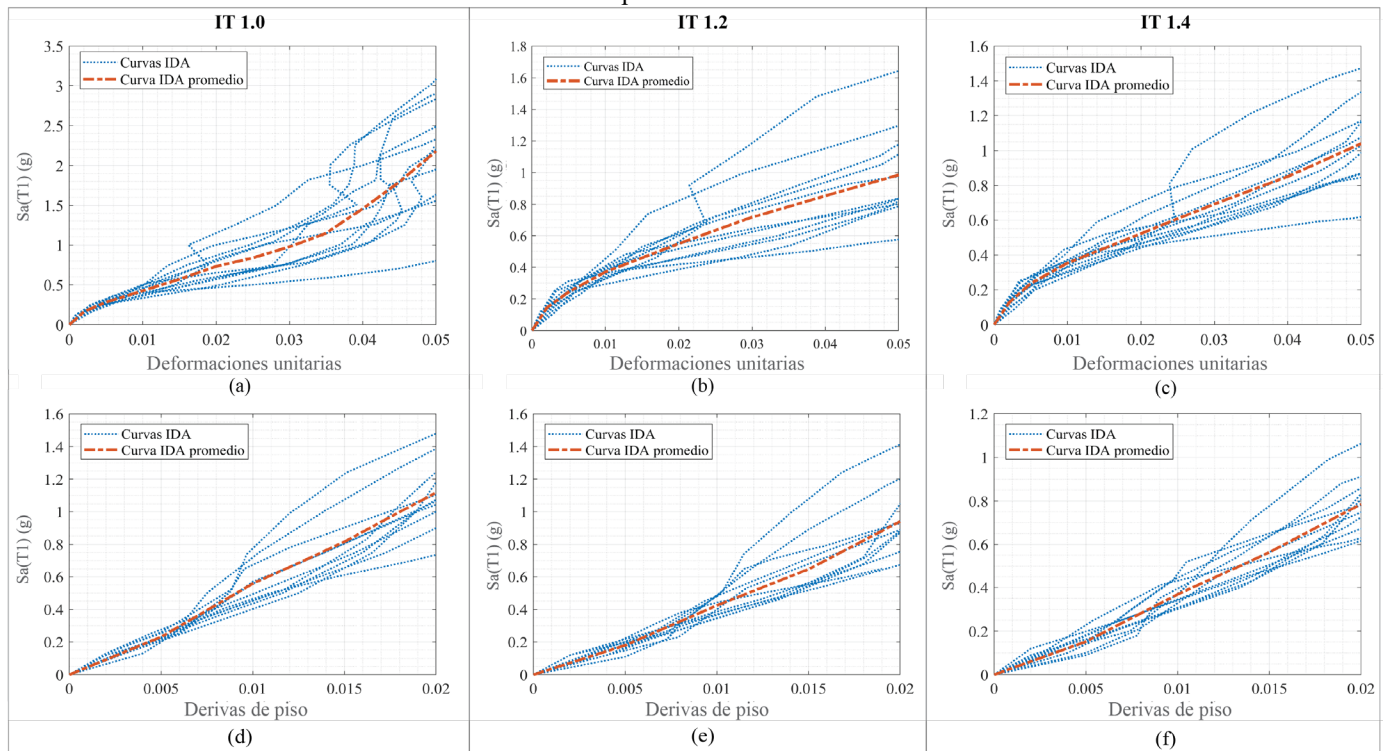
Todas las gráficas de la Figura 6 presentan el momento en que se alcanza un valor de deformación unitaria igual a 0,05; valor al cual se ha definido como estado límite de colapso.

Adicionalmente, se verificó que el mayor valor de deformación unitaria se presenta en la base del muro estructural.

## 9. ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL

El Análisis Dinámico Incremental (IDA, siglas en inglés) es un estudio paramétrico utilizado para evaluar el desempeño sísmico de una estructura. Para realizar el IDA es necesario tener uno o varios registros sísmicos que serán escalados a diferentes niveles de medida de intensidad (MI) de la aceleración máxima del terreno (Vamvatsikos & Allin Cornell, 2002). El IDA es una metodología usada para verificar como varía algún parámetro de demanda ingenieril según la intensidad del registro sísmico. Mediante el uso del análisis no lineal dinámico se calcula algún parámetro de demanda ingenieril (EDP), el cual servirá de referencia para la evaluación de la estructura ante los diferentes niveles de intensidad establecidos. Finalmente, se procede a graficar los valores de EDP obtenidos dado una MI y se obtiene las curvas IDA.

Las diferentes medidas de intensidad pueden ser representadas por: PGA (aceleración máxima del terreno), PGV (velocidad máxima del terreno),  $S_a(T1,5\%)$  (aceleración espectral con un amortiguamiento del 5% correspondiente al periodo del primer modo de vibración). Los parámetros de demanda ingenieril pueden ser los siguientes: derivas de piso, derivas totales,



**Figura 7.** Curvas IDA de los tres arquetipos con diferentes EDP: (a) Modelo IT 1.0 y EDP de deformaciones unitarias, (b) Modelo IT 1.2 y EDP de deformaciones unitarias, (c) Modelo IT 1.4 y EDP de deformaciones unitarias, (d) Modelo IT 1.0 y EDP de deriva de piso, (e) Modelo IT 1.2 y EDP de deriva de piso, y (f) Modelo IT 1.4 y EDP de deriva de piso

deformaciones unitarias, corte basal, rotaciones nodales e índice de daño. En el presente estudio, se usa como MI a la  $S_a(T1,5\%)$  y como EDP a las derivas de piso y deformaciones unitarias.

### 9.1 Curvas IDA

En la Figura 7, se presenta el grupo de curvas IDA para los diferentes arquetipos evaluadas con diferentes EDP (deformaciones unitarias y derivas de piso). Se puede observar que mientras aumenta el nivel de IT, las pendientes de las curvas IDA y los valores máximos de  $Sa(T1,5\%)$  disminuyen. Se comprueba que el modelo IT 1.0 presenta el estado límite de colapso con valores de deriva de piso mayores al 2 %, si la evaluación estructural es con EDP de deformaciones unitarias. En el modelo IT 1.0, solo con 45,4 % de los registros se presenta el estado límite de colapso cuando las derivas de piso se encuentran entre 2,0 % y 3,5 % (ver Figura 8). La máxima  $Sa(T1,5\%)$  promedio evaluada con deformaciones unitarias (2,18 g) es mayor que la máxima  $Sa(T1,5\%)$  promedio evaluada con derivas de piso (1,12 g) (ver Figura 7(a) y Figura 7(d)). Esto sucede debido a que el estado límite de colapso de la estructura se presenta con valores de derivas mayores al 2% y valores de pseudo aceleración espectral mayores a 1,12 (g).

En el modelo IT 1.2 varios registros presentan el colapso antes de un valor de deriva de piso del 2 %. En este modelo con el 100 % de los registros, se presenta el estado límite de colapso cuando las derivas de piso se encuentran entre 2,0 % y 3,5 % (ver Figura 8). La máxima  $Sa(T1,5\%)$  promedio evaluada con deformaciones unitarias (0,99 g) es mayor a la máxima  $Sa(T1,5\%)$  evaluada con derivas de piso (0,94 g) (ver Figura 7(b) y Figura 7(e)).

Cuando el valor de la IT es mayor a 1,4, más del 90% de los registros logran esforzar a la estructura hasta alcanzar un

estado límite de colapso cuando el valor de la deriva de piso se encuentra entre 2,0 % y 3,5 % (Ver Figura 8). Para el modelo IT 1.4, el valor máximo de  $Sa(T1,5\%)$  promedio obtenido con deformaciones unitarias (1,04 g) es mayor que el valor máximo  $Sa(T1,5\%)$  promedio obtenido con un EDP de derivas (0,79 g) (ver Figura 7(c) y Figura 7(f)). En todos los casos el valor promedio máximo de  $Sa(T1,5\%)$  se encuentra en las curvas IDA elaboradas con un EDP de deformaciones unitarias.

En la Figura 8, se grafican los valores de  $Sa(T1,5\%)$  y derivas de piso a los cuales se presentan los estados límites de fluencia, servicio y colapso. Se puede observar que los puntos de fluencia se presentan antes de alcanzar un valor de deriva de piso igual a 0,5 %. El estado límite de servicio se presenta cuando la deriva de piso es alrededor del 1,0% y la mayor parte de puntos de colapso se encuentran luego de alcanzar una deriva de piso igual al 2,0 %. Tomando en cuenta que los valores de deriva de piso de 0,5 %, 1,0 % y 2,0% representan un nivel de desempeño según el FEMA 356, se procedió a relacionar el estado límite de fluencia con el nivel de desempeño de OI, el estado límite de servicio con el nivel de desempeño de SV y el estado límite de colapso con el nivel de desempeño de PC. De esta manera, se elaborará las curvas de fragilidad para los diferentes niveles de desempeño (OI, SV y PC), pero basados en dos parámetros de evaluación: derivas de piso y deformaciones unitarias.

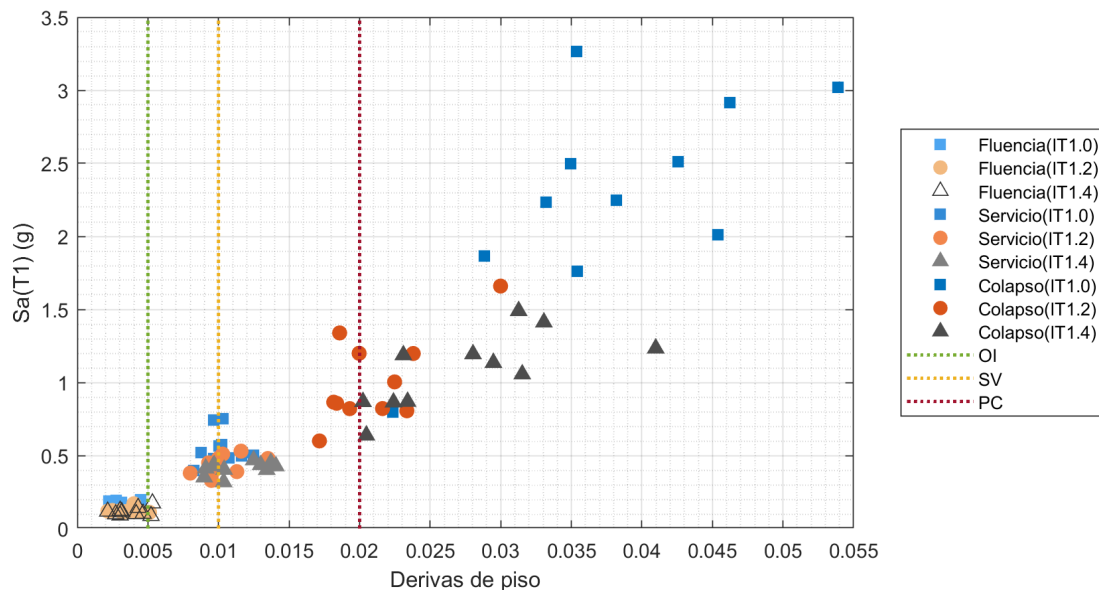


Figura 8. Relación entre estados límite de fluencia, servicio, colapso y deriva de piso

## 9.2 Comparación de curvas IDA promedio

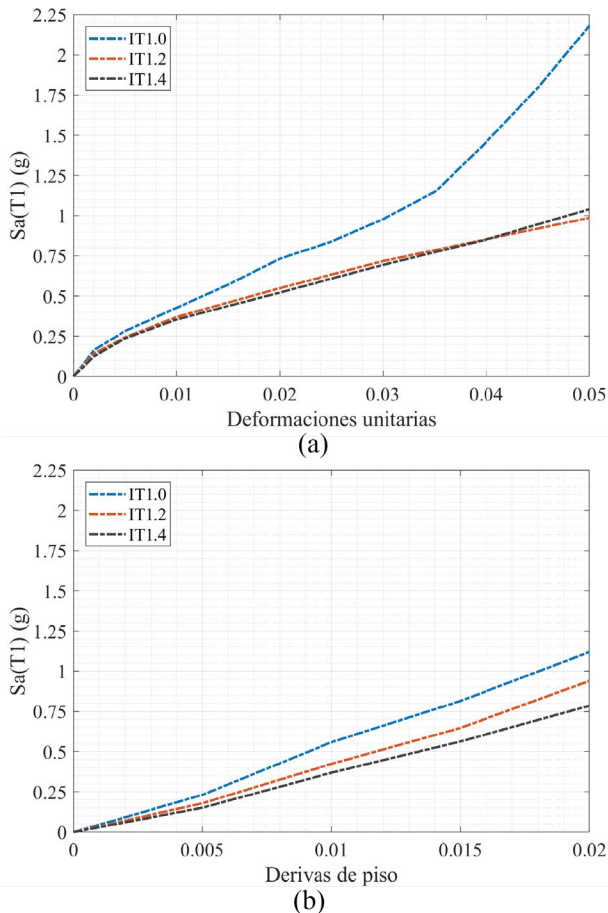
Al comparar los valores máximos de  $Sa(T1,5\%)$  promedio (evaluado con deformaciones unitarias) de los tres modelos analizados, se puede observar que la curva correspondiente al modelo con IT 1.0 presenta valores de  $Sa(T1,5\%)$  2,20 y 2,09 veces mayor que los modelos con IT 1.2 y IT 1.4, respectivamente (ver Figura 9(a)). Además, las curvas IDA promedio de los modelos con IT 1.2 y IT 1.4 presentan una

pendiente similar pero menor a la pendiente de la curva del modelo IT 1.0.

El valor máximo de  $Sa(T1,5\%)$  que produce el nivel de desempeño de prevención de colapso en las curvas IDA promedio (evaluadas con derivas de piso) del modelo IT 1.0 es 1,19 y 1,42 veces mayor que el valor obtenido con los modelos IT 1.2 y IT 1.4, respectivamente (ver Figura 9(b)). Todos los modelos presentan curvas IDA promedio con diferentes pendientes. Adicionalmente, el modelo con IT 1.4 es el que



menor valor de  $S_a(T1,5\%)$  promedio alcanza cuando la deriva tiene un valor igual a 2 %.



**Figura 9.** Curvas IDA promedio: (a) evaluadas con deformaciones unitarias y (b) evaluadas con derivas de piso

## 10. CURVAS DE FRAGILIDAD

Vielma et al (2014) mencionan que las curvas de fragilidad permiten establecer la probabilidad que tiene una estructura o un elemento de exceder cierto estado límite de daño ante alguna acción sísmica. Los estados límites de daño pueden ser cuantificados por derivas de piso, deformaciones unitarias, o aceleraciones de piso. La función de fragilidad está representada por una distribución acumulativa log normal. La siguiente expresión (Ecuación (2)) representa la función de fragilidad:

$$F_i(D) = \Phi\left(\frac{\ln(D/\theta_i)}{\beta_i}\right) \quad (2)$$

Donde el valor de la mediana de la distribución de probabilidad es representado por  $\theta$ ;  $\beta$  es la desviación estándar logarítmica;  $\Phi$  representa la función de la distribución acumulativa estándar;  $F_i(D)$  representa la probabilidad condicional de que un elemento sea dañado y  $D$  es el parámetro de demanda ingenieril (FEMA P-58, 2018).

La Figura 10 presenta las curvas de fragilidad de los diferentes arquetipos, pero tomando en cuenta dos distintas medidas de

daño (derivadas de piso y deformaciones unitarias). Figura 10(a) y Figura 10(d) muestran las curvas de fragilidad para un nivel de desempeño de ocupación inmediata (OI) evaluadas con deformaciones unitarias y derivas de piso. La Figura 10(b) y Figura 10(e) muestran las curvas de fragilidad para un nivel de desempeño de seguridad de vida (SV). La Figura 10(c) y Figura 10(f) grafican las curvas de fragilidad para un nivel de desempeño de prevención de colapso (PC) evaluadas con las diferentes medidas de daño (MD) anteriormente mencionadas.

La Tabla 4 (Ver Anexo) muestra el coeficiente de margen de ocupación inmediata (OMR), coeficiente de margen de seguridad de vida (SMR) y coeficiente de margen de prevención de colapso (PCMR). Los coeficientes de margen representan la razón entre la intensidad de OI mediana, la intensidad de SV mediana o la intensidad de PC mediana y la aceleración espectral del periodo fundamental de la estructura ante el SE, DBE o MCE, respectivamente (FEMA, 2010). Los valores de intensidad mediana (IO,50%; IS,50%; IPC,50%) representan el valor de la pseudo aceleración espectral a la cual el 50 % de los registros alcanzan un determinado nivel de desempeño. En los tres modelos analizados, se puede observar que las curvas de fragilidad para un nivel de desempeño de OI y SV presentan una mayor probabilidad de alcanzar dicho estado límite, si la evaluación de las curvas IDA se las realiza con la MD de deformaciones unitarias (ver Figura 10(a), Figura 10(b), Figura 10(d) y Figura 10(e)).

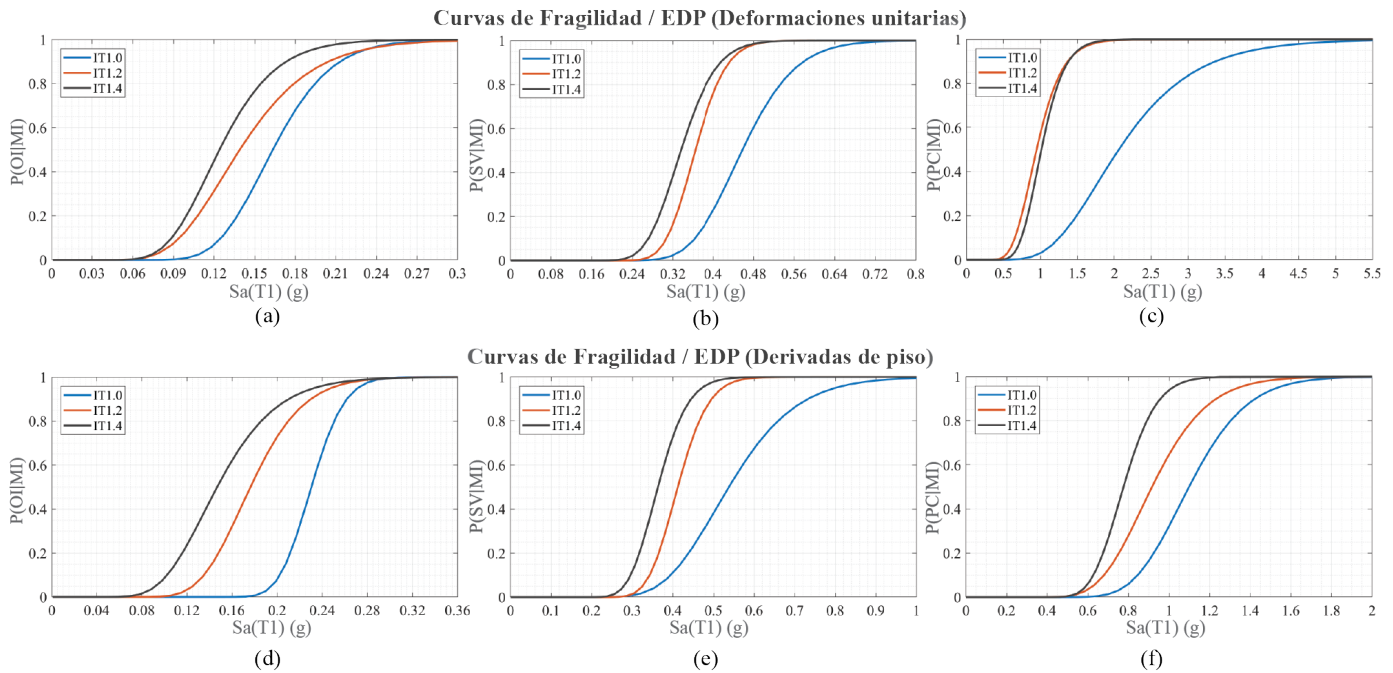
Las curvas de fragilidad para el estado límite de PC presentan una mayor probabilidad de alcanzar dicho estado límite, si la evaluación se la realiza con la MD de derivas de piso (ver Figura 10(c) y Figura 10(f)). En la Figura 10(a) y Figura 10(b) se puede observar que el modelo IT 1.4 es el más propenso a alcanzar los estados límites OI y SV, si el parámetro de evaluación es la deformación unitaria. Cuando el parámetro de evaluación es la deriva de piso, el modelo IT 1.4 es el más propenso a alcanzar todos los estados límites (Ver Figura 10(d), Figura 10(e) y Figura 10(f)).

Los coeficientes OMR de cada uno de los arquetipos disminuyen mientras aumenta el nivel de irregularidad torsional (Ver Anexo, Tabla 4). Además, el modelo IT 1.4 es el modelo que mayor  $P(OI|SE)$  (probabilidad de alcanzar el estado límite de Ocupación Inmediata ante el Sismo de Servicio) presenta de los tres arquetipos. La Tabla 4 (Ver Anexo) también muestra los coeficientes SMR de los tres arquetipos al ser evaluados ante el sismo de diseño (DBE). Se puede verificar que mientras aumenta el nivel de irregularidad torsional los coeficientes SMR disminuyen. Por ejemplo, los modelos IT 1.2 e IT 1.4 (evaluados con deformaciones unitarias) presentan una disminución del 18,6% y 22,19% de su coeficiente SMR con respecto al modelo IT 1.0. Además, se muestra que mientras mayor es el nivel de irregularidad torsional mayor es la probabilidad de alcanzar el estado límite de SV. Por ejemplo, la  $P(SV|DBE)$  (probabilidad de alcanzar el estado límite de Seguridad de Vida ante el Sismo de Diseño) del modelo IT 1.2 es 1,38 y 2,23 veces más grande que la probabilidad del modelo IT 1.0, y la  $P(SV|DBE)$  del modelo IT 1.4 es 1,37 y 2,37 veces más grande que la del modelo IT 1.0.

Los coeficientes PCMR de los tres arquetipos fueron evaluados ante el MCE (Ver Anexo, Tabla 4). Se verifica que mientras aumenta el nivel de irregularidad torsional los coeficientes PCMR disminuyen. Por ejemplo, los modelos IT 1.2 e IT 1.4 (evaluados con derivas de piso) presentan una disminución del 14,71 % y 25,17 % de su coeficiente PCMR con respecto al modelo IT 1.0. Adicionalmente, se muestra la variabilidad de la probabilidad de prevención de colapso ante diferentes niveles de irregularidad torsional. El modelo IT 1.2 evaluado con deformaciones unitarias tiene la mayor  $P(PC|MCE)$  (probabilidad de alcanzar el estado límite de Prevención de Colapso ante el Sismo Máximo Considerable)

entre el modelo IT 1.0 e IT 1.4. Cuando la evaluación se realiza por medio de derivas de piso el modelo IT 1.4 es el más crítico, ya que tiene una  $P(PC|MCE)$  8,92 veces más grande que la probabilidad del modelo IT 1.0. De forma general, se puede verificar que la variación de la irregularidad torsional aumenta la probabilidad de alcanzar el estado límite de prevención de colapso.

Finalmente, se determina la probabilidad de alcanzar el estado límite de prevención de colapso ante el sismo de diseño (DBE). Dicha probabilidad resulta ser máximo 1,19% entre todos los arquetipos con ambas medidas de daño.



**Figura 10.** Curvas de fragilidad para los tres arquetipos: (a) Ocupación Inmediata, EDP: deformaciones unitarias, (b) Seguridad de Vida, EDP: deformaciones unitarias, (c) Prevención de Colapso, EDP: deformaciones unitarias, (d) Ocupación Inmediata, EDP: derivas de piso, (e) Seguridad de vida, EDP: derivas de piso, y (f) Prevención de Colapso, EDP: derivas de piso

## 11. CONCLUSIONES

Con la finalidad de verificar la variabilidad del desempeño sísmico ante la variación del nivel de irregularidad torsional, se desarrolló tres modelos no lineales los cuales fueron evaluados ante once registros sísmicos. Las derivas de piso y deformaciones unitarias fueron tomadas como parámetros de demanda ingenieril y medidas de daño. Por medio del procedimiento IDA se obtuvo el grupo de curvas IDA de cada uno de los arquetipos con los dos diferentes parámetros de demanda ingenieril. Finalmente, se relacionan los diferentes estados límite con los niveles de desempeño, y se crean curvas de fragilidad dependiendo del nivel de irregularidad torsional y medida de daño. A continuación, se describen los principales hallazgos:

Por medio de los análisis estáticos y dinámicos no lineales, se comprobó que en los modelos con IT 1.2 e IT 1.4 existe una redistribución de esfuerzos entre los elementos resistentes a carga lateral, siendo unos elementos más esforzados que otros. Además, se comprobó que al aumentar el nivel de irregularidad torsional las respuestas globales (derivadas de piso)

y demandas locales (momento, corte, deformaciones unitarias) aumentan.

Por medio de las curvas IDA, se comprobó que el modelo IT 1.0 logra alcanzar valores más altos de pseudo aceleración espectral ( $Sa(T1,5\%)$ ) con respecto a los modelos con IT 1.2 e IT 1.4. Además, se evidenció que mientras aumenta el nivel de irregularidad torsional disminuye las pendientes de las curvas IDA.

Al comparar las curvas de fragilidad con las diferentes medidas de daño, se concluye que la evaluación con deformaciones unitarias para los niveles de desempeño de Ocupación Inmediata y Seguridad de Vida, resultan ser más conservadoras, ya que es posible alcanzar dichos niveles de desempeño con menores  $Sa(T1,5\%)$ . Para el nivel de desempeño de Prevención de Colapso, la medida de daño de deriva de piso resulta ser la más crítica, ya que solo el 27 % de los análisis obtuvieron valores de derivas de piso cercanos o iguales al 2,0% cuando se presenta el estado límite de colapso.

Se concluye que a mayor nivel de irregularidad torsional mayor es la probabilidad de alcanzar el nivel de desempeño de

prevención de colapso. Las probabilidades de alcanzar el nivel de desempeño de prevención de colapso ante el sismo máximo considerable para los modelos IT 1.2 e IT 1.4 son 18,29 % y 31,60 %, respectivamente; mientras que el modelo IT 1.0 solo tiene una probabilidad del 3,54 % de alcanzar el nivel de desempeño de prevención de colapso. Se verificó que el nivel de irregularidad torsional mayor a 1,4 aumenta la probabilidad de alcanzar el nivel de prevención de colapso 8,92 veces más que el modelo con irregularidad torsional igual a 1,0.

Al evaluar la probabilidad de alcanzar el estado límite de Seguridad de Vida ante el Sismo de diseño, nuevamente se verificó que el nivel de irregularidad torsional incrementa la probabilidad de alcanzar dicho estado límite. El modelo IT 1.0 tiene una probabilidad del 40,34 %, mientras que el modelo IT 1.4 tiene una probabilidad del 95,85 % de alcanzar el estado límite de Seguridad de Vida.

Finalmente, se concluye que el nivel de irregularidad torsional afecta al desempeño estructural, por lo tanto, es importante tener un nivel de irregularidad torsional máximo permisible que permita tener estructuras con bajas probabilidades de alcanzar el nivel de desempeño de prevención de colapso.

## REFERENCIAS

- ACI-318. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. *American Concrete Institute*.
- Aguilar, M. C. A., Haro, A. G., & Sánchez, P. C. (2016). Main Reasons of Structural Wall Collapse in Chile 2010 and New Zealand 2011 - Implications For Ecuador. *The Open Civil Engineering Journal*, 10(1), 469–480. <https://doi.org/10.2174/1874149501610010469>
- Almeida, J. P., Tarquini, D., & Beyer, K. (2014). Modelling Approaches for Inelastic Behaviour of RC Walls: Multi-level Assessment and Dependability of Results. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23(1), 69–100. <https://doi.org/10.1007/s11831-014-9131-y>
- Araya-Ietelier, G., Parra, P., Lopez-garcia, D., Garcia-Valdes, A., Candia, G., & Lagos, R. (2019). Evaluación de la probabilidad de colapso de un edificio de oficinas chileno de hormigón armado debido a actividad sísmica. *ACHISINA*, 1–12. <https://www.researchgate.net/publication/332303868>
- ASCE. (2016). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. *American Society of Civil Engineers*, 1–889. <https://doi.org/10.1061/9780784414248>
- Cagua. (2022). Comportamiento no lineal de pórticos de hormigón armado y pórticos de acero con y sin disipadores de energía tipo TADAS, Shear Link Bozzo y Barras de Pandeo Restringido para el escenario sísmico de Quito [Universidad De Las Fuerzas Armadas - ESPE]. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/35983>
- Cando, M. A. (2020). Efecto de la rigidez en el desempeño sísmico de edificios estructurados con muros de hormigón armado [Pontificia Universidad Católica de Chile]. <https://doi.org/10.7764/tesisUC/ING/57974>
- Cando, M. A., Hube, M. A., Parra, P. F., & Arteta, C. A. (2020). Effect of stiffness on the seismic performance of code-conforming reinforced concrete shear wall buildings. *Engineering Structures*, 219, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110724>
- Dabaghi, M., George Saad, M., & Allhassania, N. (2019). Seismic collapse fragility analysis of reinforced concrete shear wall buildings. *Earthquake Spectra*, 35(1), 383–404. <https://doi.org/10.1193/121717EQS259M>
- Echeverría-Landeta, M. J., Jünemann-Ureta, R., & Liel, A. B. (2022). Modelación y análisis no lineal de muros estructurales de hormigón armado. *Investigación y Desarrollo*, 15(1), 73–89. <https://doi.org/10.31243/id.v15.2022.1594>
- EERI. (2016). EERI Earthquake Reconnaissance Team Report: M7.8 Muisne, Ecuador Earthquake on April 16, 2016. *Earthquake Engineering Research Institute*, October, 1–92. <https://www.eeri.org/>
- FEMA. (2010). Evaluation of the FEMA P-695 Methodology for Quantification of Building Seismic Performance Factors (NIST GCR 10-917-8). *National Institute of Standards and Technology*, 1–84.
- FEMA 356. (2000). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. *Federal Emergency Management Agency*, 1–518.
- FEMA P-2012. (2018). Assessing Seismic Performance of Buildings with Configuration Irregularities. *APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL*, September, 1–366.
- FEMA P-58. (2018). Seismic performance assessment of buildings. *APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL*, 11(10), 1–340. <https://doi.org/10.3390/buildings11100440>
- Fischinger, M., Isaković, T., Kolozvari, K., & Wallace, J. (2019). Guest editorial: Nonlinear modelling of reinforced concrete structural walls. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17, 6359–6368. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00715-z>
- Gallardo, J. A., de la Llera, J. C., Santa María, H., & Chacón, M. F. (2021). Damage and sensitivity analysis of a reinforced concrete wall building during the 2010, Chile earthquake. *Engineering Structures*, 240, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112093>
- Gharakhanloo, A. (2014). Distributed and Concentrated Inelasticity Beam-Column Elements used in Earthquake Engineering. *Norwegian University of Science and Technology*.
- Gogus, A., & Wallace, J. W. (2015). Seismic Safety Evaluation of Reinforced Concrete Walls through FEMA P695 Methodology. *Journal of Structural Engineering*, 141, 1–18. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001221](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001221)
- Haro, A. G., Kowalsky, M., & Chai, Y. H. (2019). Out-of-plane buckling instability limit state for boundary regions of special RC structural walls. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17, 5159–5182. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00667-4>
- Kolozvari, K., Arteta, C., Fischinger, M., Gavridou, S., Hube, M., Isaković, T., Lowes, L., Orakcal, K., Vásquez, J., & Wallace, J. (2018). Comparative study of state-of-the-art macroscopic models for planar reinforced concrete walls. *ACI Structural Journal*, 115(6), 1637–1657.

- <https://doi.org/10.14359/51710835>
- Kolozvari, Kristijan, Orakcal, K., & Wallace, J. W. (2015). Shear-Flexure Interaction Modeling for Reinforced Concrete Structural Walls and Columns under Reversed Cyclic Loading. *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, 1–143. [http://peer.berkeley.edu/publications/peer\\_reports/reports\\_2015/webPEER-2015-12-kolozvari.pdf](http://peer.berkeley.edu/publications/peer_reports/reports_2015/webPEER-2015-12-kolozvari.pdf)
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *J. Struct. Eng.*, 114(8), 1804–1826. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(180](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(180)
- McKenna, F., Fenves, G. L., Scott, M. H., & Jeremic, B. (2000). *Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees)*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA. <https://opensees.berkeley.edu/>
- NEC-SE-CG. (2015). Cargas (No sísmicas). *Norma Ecuatoriana de La Construcción*, 1–44.
- NEC-SE-DS. (2015). Peligro Sísmico - Diseño Sismo Resistente. *Norma Ecuatoriana de La Construcción*, 1–148.
- NEC-SE-HM. (2015). Estructuras de Hormigón Armado. *Norma Ecuatoriana de La Construcción*, 1–122.
- NORMA E030. (2020). Diseño Sismorresistente. *Reglamento Nacional de Edificaciones*, 1–81.
- NSR-10. (2012). Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente. *Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica*, 1–206.
- Orakcal, K., & Wallace, J. W. (2006). Flexural Modeling of Reinforced Concrete Walls— Experimental Verification. *ACI Structural Journal*, 103(2), 196–206. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130)
- Páez, D., Zabala, J., & Rodríguez, Y. (2017). Soft.Story, a Common Flaw in the Earthquake in Pedernales. *Revista CIENCIA*, 19, 59–75.
- Priestley, M. J. N., & Kowalsky, M. J. (2000). Direct Displacement-Based Seismic Design of Concrete Buildings. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33(4), 421–441. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.33.4.421-444>
- Sarango, J., Haro, A. G., Acuna, P., & Caiza, P. (2021). Out-of-plane buckling of boundary regions in planar RC structural walls: an approach to prevent instability. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 9(3), 538–547. <https://doi.org/10.21533/pen.v9i3.2189>
- Seismosoft. (2022). *SeismoStruct 2022*— A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures. *Seismosoft Ltd.*
- Sritharan, S., Beyer, K., Henry, R. S., Chai, Y. H., Kowalsky, M., & Bull, D. (2014). Understanding Poor Seismic Performance of Concrete Walls and Design Implications. *Earthquake Spectra*, 30(1), 307–334. <https://doi.org/10.1193/021713EQS036M>
- Tena, A. (2010). Irregularidad Estructural y su Efecto en la Respuesta Sísmica de Edificios. In *V Congreso Iberoamericano de Ingeniería Civil, Mérida* (Vol. 88, Issue Noviembre).
- Thomsen, J. H., & Wallace, J. W. (2004). Displacement-Based Design of Slender Reinforced Concrete Structural Walls - Experimental Verification. *Journal of Structural Engineering*, 130(4), 618–630. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:4\(618\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:4(618))
- Vamvatsikos, D., & Allin Cornell, C. (2002). Incremental Dynamic Analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 491–514. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>
- Vielma, J. C., Barrios, A., & Alfaro, A. (2014). Determinación de curvas de fragilidad mediante análisis incremental dinámico. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, 171–186. <https://doi.org/10.5335/rsee.v11i1.4463>

## BIOGRAFÍAS



**Franklin, Ulcuango**, obtuvo su título en Ingeniería Civil con mención en Estructuras en la Escuela Politécnica Nacional (EPN) de Ecuador, en 2014. Egresado del programa de Maestría en Investigación en Ingeniería Civil mención Estructuras de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE). Actualmente se desempeña como revisor estructural en el Distrito Metropolitano de Quito. Sus áreas de interés son: el análisis no lineal de elementos de hormigón armado y la evaluación sísmica basada en desempeño.



**Ana Gabriela, Haro** obtuvo su título de Ph.D. en Ingeniería Civil de la North Carolina State University en los Estados Unidos, donde le confirieron el premio Thomas G. Coffey por su destacada trayectoria en investigación. En Ecuador, obtuvo su Maestría en Estructuras de la Escuela Politécnica Nacional, y su título de Ingeniera Civil de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Es académica en su alma máter, la ESPE, y en la Universidad San Francisco de Quito. Gabriela es Coordinadora del Grupo de Investigación en Estructuras y Construcciones y Coordinadora de la Maestría de Investigación en Estructuras de la ESPE. Además, es autora de varias publicaciones científicas y participa en proyectos de investigación nacionales e internacionales. Su área de interés se centra en el diseño y evaluación sísmicos basados en desempeño y resiliencia.

## ANEXOS

Tabla 1. Secciones y refuerzos longitudinales de columnas y muros estructurales de los tres arquetipos.

| <b>Refuerzos longitudinales de columnas</b>                            |                    |                       |            |             |            |       |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|------------|-------------|------------|-------|
| <b>Pisos</b>                                                           |                    | <b>Secciones (mm)</b> |            |             |            |       |
|                                                                        |                    | <b>C1</b>             | <b>C2</b>  | <b>C3</b>   | <b>C10</b> |       |
|                                                                        |                    | 700X700               | 700X700    | 700x700     | 500x900    |       |
| <b>Pórtico Especial a Momento</b>                                      | IT 1.0             | 1                     | 16Φ20      | 16Φ22       | 16Φ20      |       |
|                                                                        |                    | 2-16                  | 16Φ20      | 16Φ20       | 16Φ20      |       |
|                                                                        | IT 1.2             | 1-2                   | 16Φ20      | 4Φ28+12Φ22  | 16Φ22      | 16Φ20 |
|                                                                        |                    | 3-16                  | 16Φ20      | 16Φ20       | 16Φ20      | 16Φ20 |
|                                                                        | IT 1.4             | 1-2                   | 16Φ20      |             | 16Φ22      | 16Φ20 |
|                                                                        |                    | 3-16                  | 16Φ20      |             | 16Φ20      | 16Φ20 |
| <b>Refuerzos longitudinales de muros estructurales (Modelo IT 1.0)</b> |                    |                       |            |             |            |       |
| <b>Aceros longitudinales</b>                                           |                    |                       |            |             |            |       |
| <b>Pisos</b>                                                           | <b>Dimensiones</b> | <b>Cabezales</b>      |            | <b>Alma</b> |            |       |
|                                                                        | L(m) x e(m)        | Lc (m)                |            |             |            |       |
| <b>IT 1.0</b>                                                          | Muro1              | 1-4                   | 6,0 x 0,35 | 1,00        | 12Φ25      | 66Φ18 |
|                                                                        |                    | 5-10                  | 6,0 x 0,35 | 1,00        | 12Φ12      | 50Φ10 |
|                                                                        |                    | 11-16                 | 6,0 x 0,35 | 0,80        | 10Φ10      | 62Φ10 |
|                                                                        | Muro2              | 1-4                   | 6,0 x 0,35 | 1,00        | 12Φ25      | 66Φ18 |
|                                                                        |                    | 5-10                  | 6,0 x 0,35 | 1,00        | 12Φ12      | 50Φ10 |
|                                                                        |                    | 11-16                 | 6,0 x 0,35 | 0,80        | 10Φ10      | 62Φ10 |
|                                                                        | Muro3              | 1-4                   | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 12Φ22      | 54Φ16 |
|                                                                        |                    | 5-10                  | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 12Φ12      | 40Φ10 |
|                                                                        |                    | 11-16                 | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 10Φ10      | 44Φ10 |
|                                                                        | Muro4              | 1-4                   | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 12Φ22      | 54Φ16 |
|                                                                        |                    | 5-10                  | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 12Φ12      | 40Φ10 |
|                                                                        |                    | 11-16                 | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 10Φ10      | 44Φ10 |
| <b>Refuerzos longitudinales de muros estructurales (Modelo IT 1.2)</b> |                    |                       |            |             |            |       |
| <b>Aceros longitudinales</b>                                           |                    |                       |            |             |            |       |
| <b>Pisos</b>                                                           | <b>Dimensiones</b> | <b>Cabezales</b>      |            | <b>Alma</b> |            |       |
|                                                                        | L(m) x e(m)        | Lc (m)                |            |             |            |       |
| <b>IT 1.2</b>                                                          | Muro1              | 1-4                   | 6,0 x 0,35 | 1,15        | 12Φ25      | 66Φ18 |
|                                                                        |                    | 5-10                  | 6,0 x 0,35 | 1,15        | 12Φ12      | 50Φ10 |
|                                                                        |                    | 11-16                 | 6,0 x 0,35 | 0,80        | 10Φ10      | 62Φ10 |
|                                                                        | Muro2              | 1-4                   | 6,0 x 0,35 | 1,15        | 12Φ28      | 66Φ18 |
|                                                                        |                    | 5-10                  | 6,0 x 0,35 | 1,15        | 12Φ12      | 50Φ10 |
|                                                                        |                    | 11-16                 | 6,0 x 0,35 | 0,80        | 10Φ10      | 62Φ10 |
|                                                                        | Muro3              | 1-4                   | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 12Φ22      | 54Φ16 |
|                                                                        |                    | 5-10                  | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 12Φ12      | 40Φ10 |
|                                                                        |                    | 11-16                 | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 10Φ10      | 44Φ10 |
|                                                                        | Muro4              | 1-4                   | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 12Φ22      | 54Φ16 |
|                                                                        |                    | 5-10                  | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 12Φ12      | 40Φ10 |
|                                                                        |                    | 11-16                 | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 10Φ10      | 44Φ10 |
| <b>Refuerzos longitudinales de muros estructurales (Modelo IT 1.4)</b> |                    |                       |            |             |            |       |
| <b>Aceros longitudinales</b>                                           |                    |                       |            |             |            |       |
| <b>Pisos</b>                                                           | <b>Dimensiones</b> | <b>Cabezales</b>      |            | <b>Alma</b> |            |       |
|                                                                        | L(m) x e(m)        | Lc (m)                |            |             |            |       |
| <b>IT 1.4</b>                                                          | Muro1              | 1-4                   | 6,0 x 0,35 | 1,20        | 12Φ25      | 66Φ18 |
|                                                                        |                    | 5-10                  | 6,0 x 0,35 | 1,20        | 12Φ12      | 50Φ10 |
|                                                                        |                    | 11-16                 | 6,0 x 0,35 | 0,80        | 10Φ10      | 62Φ10 |
|                                                                        | Muro2              | 1-4                   | 6,0 x 0,35 | 1,20        | 15Φ28      | 66Φ18 |
|                                                                        |                    | 5-10                  | 6,0 x 0,35 | 1,20        | 12Φ12      | 50Φ10 |
|                                                                        |                    | 11-16                 | 6,0 x 0,35 | 0,80        | 10Φ10      | 62Φ10 |
|                                                                        | Muro3              | 1-4                   | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 12Φ22      | 54Φ16 |
|                                                                        |                    | 5-10                  | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 12Φ12      | 40Φ10 |
|                                                                        |                    | 11-16                 | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 10Φ10      | 44Φ10 |
|                                                                        | Muro4              | 1-4                   | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 12Φ22      | 54Φ16 |
|                                                                        |                    | 5-10                  | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 12Φ12      | 40Φ10 |
|                                                                        |                    | 11-16                 | 5,0 x 0,35 | 0,85        | 10Φ10      | 44Φ10 |

**Tabla 2.** Parámetros del concreto no confinado, concreto confinado y acero de refuerzo

| Concreto no confinado                                                  |                        |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Parámetros                                                             | Valores                |
| Esfuerzo de compresión (kPa)                                           | 42 747                 |
| Esfuerzo de tensión (kPa)                                              | 2 033,95               |
| Módulo de elasticidad (kPa)                                            | 30 729 159,28          |
| Deformación unitaria al esfuerzo pico (m/m)                            | 0,0025                 |
| Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )                                   | 24                     |
| Factores de confinamiento                                              |                        |
|                                                                        | Factores               |
| No confinado                                                           | 1,0                    |
| Confinamiento del alma del muro                                        | 1,0                    |
| Confinamiento elementos de borde                                       | 1,11                   |
| Acero                                                                  |                        |
| Parámetros                                                             | Modelo A               |
| Módulo de elasticidad (kPa)                                            | 2,28 x 10 <sup>8</sup> |
| Esfuerzo de fluencia (kPa)                                             | 443 000                |
| Parámetro de endurecimiento por deformación                            | 0,03                   |
| Parámetro de forma inicial de la curva de transición                   | 20                     |
| Coefficiente de calibración de la forma de la curva de transición (A1) | 18,5                   |
| Coefficiente de calibración de la forma de la curva de transición (A2) | 0,2                    |
| Coefficiente de calibración de endurecimiento isotrópico (A3)          | 0                      |
| Coefficiente de calibración de endurecimiento isotrópico (A4)          | 1                      |
| Deformación unitaria de fractura / pandeo                              | 0,2                    |
| Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )                                   | 78                     |

**Tabla 3.** Registros sísmicos seleccionados.

| Registro | Magnitud       | Año  | Estación | Rrup (km)             |       |
|----------|----------------|------|----------|-----------------------|-------|
| 1        | Landers        | 7,28 | 1992     | Joshua Tree           | 11,03 |
| 2        | Loma Prieta    | 6,93 | 1989     | Capitola              | 15,23 |
| 3        | Kobe           | 6,9  | 1995     | Nishi-Akashi          | 7,08  |
| 4        | Kocaeli        | 7,51 | 1999     | Duzce                 | 15,37 |
| 5        | Chi-Chi        | 7,62 | 1999     | TCU045                | 26    |
| 6        | Christchurch   | 6,2  | 2011     | Botanical Gardens     | 5,55  |
| 7        | Manjil         | 7,37 | 1990     | Abbar                 | 12,55 |
| 8        | Gazli          | 6,8  | 1976     | Karakyr               | 5,46  |
| 9        | Cape Mendocino | 7,01 | 1992     | Ferndale Fire Station | 19,32 |
| 10       | Northridge-01  | 6,69 | 1994     | Newhall - Fire Sta    | 5,92  |
| 11       | Westmorland    | 5,9  | 1981     | Westmorland Fire Sta  | 6,5   |

**Tabla 4.** Coeficientes de margen y probabilidad de alcanzar los diferentes estados límites.

| Coeficientes OMR y probabilidad de alcanzar el estado límite OI ante el SE  |          |          |            |         |            |             |            |         |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------|----------|------------|---------|------------|-------------|------------|---------|
| IO,50 %                                                                     |          |          | OMR        |         |            | % P(OI SE)  |            |         |
| MD                                                                          |          |          | MD         |         |            | MD          |            |         |
| Modelo                                                                      | T1 (seg) | Sa (SE)  | Def. Unit. | Derivas | Def. Unit. | Derivas     | Def. Unit. | Derivas |
| IT 1.0                                                                      | 1,64     | 0,254    | 0,163      | 0,230   | 0,64       | 0,91        | 98,33      | 83,69   |
| IT 1.2                                                                      | 1,68     | 0,248    | 0,139      | 0,176   | 0,56       | 0,71        | 97,28      | 95,05   |
| IT 1.4                                                                      | 1,74     | 0,239    | 0,124      | 0,147   | 0,52       | 0,62        | 99,39      | 95,91   |
| Coeficiente SMR y probabilidad de alcanzar el estado límite SV ante el DBE  |          |          |            |         |            |             |            |         |
| IS,50 %                                                                     |          |          | SMR        |         |            | % P(SV DBE) |            |         |
| MD                                                                          |          |          | MD         |         |            | MD          |            |         |
| Modelo                                                                      | T1 (seg) | Sa (DBE) | Def. Unit. | Derivas | Def. Unit. | Derivas     | Def. Unit. | Derivas |
| IT 1.0                                                                      | 1,64     | 0,507    | 0,458      | 0,538   | 0,90       | 1,06        | 71,58      | 40,34   |
| IT 1.2                                                                      | 1,68     | 0,495    | 0,364      | 0,412   | 0,74       | 0,83        | 98,96      | 89,97   |
| IT 1.4                                                                      | 1,74     | 0,478    | 0,336      | 0,363   | 0,70       | 0,76        | 98,4       | 95,85   |
| Coeficiente PCMR y probabilidad de alcanzar el estado límite PC ante el MCE |          |          |            |         |            |             |            |         |
| IPC,50 %                                                                    |          |          | PCMR       |         |            | %P(PC MCE)  |            |         |
| MD                                                                          |          |          | MD         |         |            | MD          |            |         |
| Modelo                                                                      | T1 (seg) | Sa (MCE) | Def. Unit. | Derivas | Def. Unit. | Derivas     | Def. Unit. | Derivas |
| IT 1.0                                                                      | 1,64     | 0,761    | 2,06       | 1,10    | 2,71       | 1,45        | 0,48       | 3,54    |
| IT 1.2                                                                      | 1,68     | 0,743    | 0,948      | 0,916   | 1,28       | 1,23        | 19,80      | 18,29   |
| IT 1.4                                                                      | 1,74     | 0,717    | 1,013      | 0,776   | 1,41       | 1,08        | 7,60       | 31,60   |

# Generation of Flows Applying a Simple Method of Flood Routing to Monthly Level in La Leche Basin, Peru

Caicedo, Máximo<sup>1,\*</sup> ; Villegas, Luis<sup>2</sup> ; Arriola, Guillermo<sup>2</sup> ; Cayatopa, Royser<sup>2</sup> ; García, Juan<sup>2</sup> ; Marín, Noe<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Pimentel, Perú

<sup>2</sup>Universidad Señor de Sipán, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Pimentel, Perú

**Abstract:** The flood routing is generally used in the analysis and evaluation of floods; however, it has been scarcely explored in the extent and determination of flows. Therefore, this research aimed to generate flows applying a simple method of flood routing known as Muskingum to monthly level, in the La Leche basin of Peru. The basin in question was chosen, since in the last 40 years it has suffered major floods, affecting a large part of the population, farmland and local infrastructure, which is why it is necessary to address its study. The methodology was of applied type and comparative non-experimental design. Due to the fact that the flood routing uses the parameters of proportionality of volume and weighting of routing in defined intervals of time, it was considered convenient to use statistical indicators to optimize the comparison of the flows registered in the hydrometric stations and the hydrographs of the simulation of a hydrological model rainfall-runoff type for different return periods, obtaining significant results in each case, according to the Pearson correlation, the Schultz criterion, the Nash-Sutcliffe criterion, the mass balance error and the t-test for two samples assuming equal variances. Finally, it is concluded that flows can be established using the flood routing with the Muskingum method in the La Leche basin, and can also be used in simulated discharges where meteorological and hydrometric information is available.

**Keywords:** Flows, basin, hydrographs, hydrology, flood routing

## Generación de Caudales Aplicando un Método Simple de Tránsito de Avenidas a Nivel Mensual en La Cuenca La Leche, Perú

**Resumen:** El tránsito de avenidas por lo general es usado en el análisis y evaluación de inundaciones, sin embargo, ha sido poco estudiado en la extensión y determinación de caudales. Por ello, esta investigación tuvo por objetivo generar caudales aplicando un método simple de tránsito de avenidas conocido como Muskingum a nivel mensual, en la cuenca La Leche de Perú. Se escogió la cuenca en mención, pues en los últimos 40 años ha sufrido grandes inundaciones, viéndose afectada gran parte de la población, terrenos de cultivo e infraestructura local, por lo que se requiere abordar su estudio. La metodología fue del tipo aplicada y de diseño no experimental comparativo. Debido a que el tránsito de avenidas emplea los parámetros de proporcionalidad de volumen y ponderación del tránsito en intervalos de tiempo definido, se creyó conveniente usar indicadores estadísticos para optimizar la comparación de los caudales registrados en las estaciones hidrométricas y los hidrogramas de la simulación de un modelo hidrológico tipo precipitación-escorrentía para diferentes periodos de retorno, obteniéndose significativos resultados en cada caso, según la correlación de Pearson, el criterio de Schultz, el criterio de Nash-Sutcliffe, el error de balance de masas y la prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales. Finalmente, se concluye que se pueden establecer caudales empleando el tránsito de avenidas con el método Muskingum en la cuenca La Leche, además pueden utilizarse en descargas simuladas donde se disponga de información meteorológica e hidrométrica.

**Palabras clave:** Caudales, cuenca, hidrogramas, hidrología, tránsito de avenidas

### 1. INTRODUCTION

The study of floods has been a great challenge in different parts of world, which has been approached from different points of view over time. However, its analysis and prediction has

generally focused on the great potential that it can cause a river to overflow (Zheng et al., 2018). It is for this reason that is one of the most effective methods that has been applied in the flood routing (Lee et al, 2018). Because it is a technique that allows to determine the discharge and flood hydrograph in a river

\*mcaicedoperu@gmail.com

Recibido: 05/07/2023

Aceptado: 01/12/2023

Publicado en línea: 09/02/2023

10.33333/rp.vol53n1.09

CC 4.0

section of any hydrographic basin, using for this purpose the historical records of the flow upstream of said basin (Bazargan & Norouzi, 2018); previously using the hydrometric and pluviometric information available in the study area (Kang & Zhou, 2018). In this sense, the optimal prediction of flows is required to allow the necessary measures to be taken not only for the protection, evacuation and warning systems of potential vulnerable areas in the short and medium term, but also for water resources management and territorial planning (Ayala et al., 2018). Another relevant aspect is the evaluation of the hydraulic infrastructure, since when maximum flows occur, these directly affect the useful life of the hydraulic infrastructure, generating uncertainty, especially in emergency situations (Guachamín et al., 2019; Matovelle et al., 2022).

There are various procedures for estimating flows in basins using the flood routing. Among these methodologies those of hydrological type, those of hydraulic type and those that are complemented with physical and numerical models stand out (Fenton, 2019). However, most of them are complex and require specialized software to obtain optimal results. Likewise, in some cases they require a large amount of information from the study area (Hernández-Andrade & Martínez-Martínez, 2019). That is why within these techniques a common and practical methodology stands out, called the Muskingum method, since it stands out as a simple and precise procedure for the study of maximum flows and evaluation of hydrographs (Bozorg-Haddad et al., 2020; Farzin et al., 2018).

The Muskingum method is a simple type of hydrological approach to the general scheme of flood routing and its variation is given in relation to the arithmetic average storage (Vatankhah, 2021). Therefore, its application in hydrographic basins has shown good fits and significant correlations for flows compared to other methods (Bozorg-Haddad et al., 2019; Gąsiorowski & Szymkiewicz, 2020). However, the Muskingum method has been scarcely explored in the extension and determination of flows, despite the fact that it does not require specific knowledge of the transverse and longitudinal geometry of river (Alhumoud & Almashan, 2019).

In this context, the purpose of studying the Muskingum method is to quantify flood routing that may occur in the basin to prevent subsequent disasters that could harm human life (Akbari et al., 2020; Katipoğlu & Sarıgöl, 2023). Additionally, this method has contributed to the development of innovative hydrological models based on estimating the basic parameters of flood routing (Zang et al., 2020; Pashazadeh & Javan, 2020). Such parameters are commonly known as the linear type, which are represented in the proportionality of volume, the weighting of routing in time intervals and the duration of flood routing (Norouzi & Bazargan, 2020). Furthermore, significant improvements have been incorporated into these parameters and the original method itself, commonly known as optimization algorithms and machine learning for quantifying output flows using hydrographs (Khalifeh et al., 2020; Okkan & Kirdemir, 2020; Qiang et al., 2020).

In Peru, the flood routing has been scarcely studied, there are only two investigations published by Ayala et al. (2018) and

Arriola et al. (2021), who point out the great capacity of Muskingum method for the estimation of flows based on the available climatic information. For these reasons, the importance of its application in other river basins arises, being the northwestern zone of Peru, a very important area to study, mainly the La Leche basin.

Because due to the effects of the intense rains and maximum floods that occurred in the first months of the years 1982, 1998, 2017 and 2023, the basin of this river has suffered major floods, and this affected a large part of the population, farmland and local infrastructure, so it is necessary to address its study in terms of the extent of flows, for prediction and prevention purposes.

In this sense, the objective of this research was to generate flows through the application of a simple method of flood routing known as Muskingum to monthly level, in the La Leche basin of Peru. The use of Muskingum method, as indicated by the previously cited investigations, has demonstrated the great performance of this methodology in flow forecasting and in the determination of outflow hydrographs in basins, while being a simple method under the approach of flood routing makes its application practical and very accurate in the generation of flows from the data available at a hydrometric station, without the need to incorporate complex procedures and complementary elements to the climatic data of the study area.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Study zone

The La Leche basin is located in Peruvian northwest (Figure 1), between the geographic coordinates 80°00' to 79°10' west longitude and 6°00' to 6°40' south latitude. It also covers part of Lambayeque and Cajamarca Regions, which makes its location a strategic area in Peruvian northwest for the development of the population in the social, economic and tourist sectors. Likewise, the basin belongs to the Pacific 5 hydrological region, as it is one of the 17 basins that comprise this area (SENAMHI, 2017).

The contributing rivers from the sources of this basin correspond to the Sangana and Moyan sub-basins, where the Sangana River stands out as the main contributor, since it originates in the Andes mountain range of Peru. The basin area is 1606.61 km<sup>2</sup>, it has a perimeter of 297.25 km, with an average width of 16.03 km and the length of river is 100.25 km.

Regarding the altitude (Figure 2a), La Leche basin presents two zones with marked elevations. The first, commonly called the medium-low zone, whose extension is smaller, ranging from 25 m.s.n.m. up to 1833 m.s.n.m. The second part, known as the high zone, its surface is larger, varies from the upper level to 1833 m.s.n.m. up to 4093 m.s.n.m. Concerning to the average temperature (Figure 2b), the medium-low zone exceeds 30°C, even reaching 39°C and the high zone, its temperature drops to 19°C.



The average rainfall (Figure 2c) and the maximum rainfall (Figure 2d) are variable throughout the year; however, the maximum values are concentrated in the central part of the basin and due to its altitudinal characteristics, the

concentration of rainfall tends to be generated in the upper zone and therefore discharges increase in the lower part of the basin.

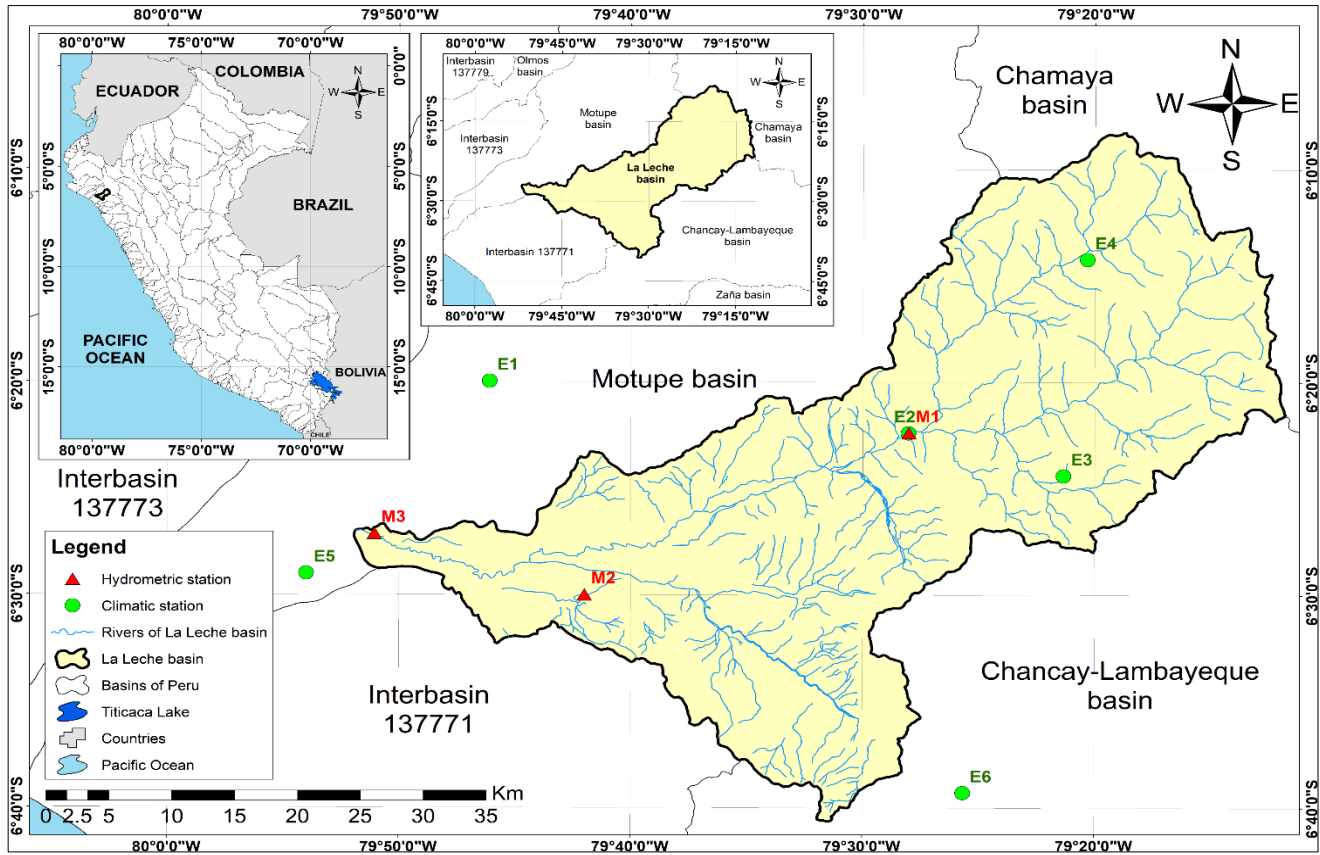


Figure 1. Location of the La Leche basin

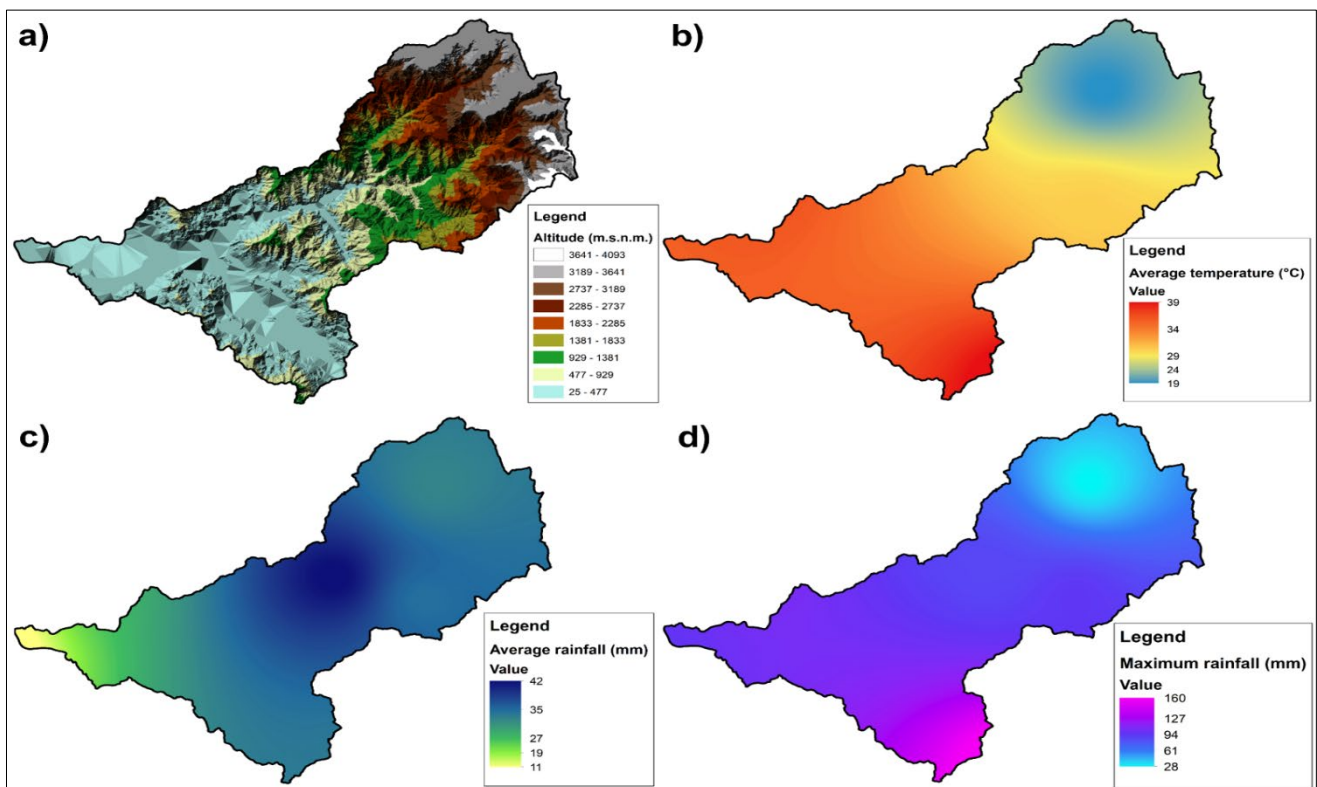


Figure 2. a) Altitude, b) Average temperature, c) Average rainfall and d) Maximum rainfall of the La Leche basin

2.2 Collection and analysis of information

The collection of information made it possible to establish that the La Leche basin has three climatic stations (code E) and three hydrometric stations (code M) within its expansion area, while the other three climatic stations belong to the surrounding basins (Table 1). The available records of the mentioned stations were obtained from the free access virtual pages of Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) of Peru and the Autoridad Nacional del Agua (ANA) of Peru. The period of records in each station was variable since a homogeneous length of data is not available for both rainfall and flows, as shown in the second column of Table 1.

To evaluate possible erroneous data, which could result from existing records or from some operational problem, a quality control was applied to the data from each station, starting initially with visual analysis using box diagrams at 95% of probability, to identify outliers (Lavado et al., 2013); also excluding the months that varied at least three standard deviations from the monthly average (Luna-Romero et al., 2018). As a reference, the box diagrams per month are shown (Figure 3), for the rainfall considered in the present study.

As indicated in Figure 3, the distribution of rainfall throughout the months is seasonal in this area of Peru, since in the first

four months of year there is an increase in rainfall, while in the following periods it decreases gradually. The most notorious cases occur in the Puchaca climatic station (Figure 3c), Granja Militar Sasape climatic station (Figure 3d) and Toccoche climatic station (Figure 3e).

Table 1. Climatic and hydrometric stations considered for the study zone

| Station code | Station name and recording period | Basin to which it belongs | Altitude (m.s.n.m.) | South latitude | West longitude |
|--------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------|----------------|
| E1           | Jayanca (1964-2018)               | Motupe                    | 102.70              | 6°19'58"       | 79°46'06"      |
| E2           | Puchaca (1963-2017)               | La Leche                  | 336.00              | 6°22'24"       | 79°28'02"      |
| E3           | Toccoche (1964-2018)              | La Leche                  | 1435.00             | 6°24'24"       | 79°21'21"      |
| E4           | Incahuasi (1964-2018)             | La Leche                  | 3052.00             | 6°14'14"       | 79°20'20"      |
| E5           | Granja Militar Sasape (1966-1975) | Motupe                    | 45.00               | 6°28'60"       | 79°54'00"      |
| E6           | Tinajones (1964-2018)             | Chancay-Lambayeque        | 22.60               | 6°39'18"       | 79°25'40"      |
| M1           | Puchaca (1922-2021)               | La Leche                  | 345.00              | 6°22'23"       | 79°28'01"      |
| M2           | Desaguadero (1956-1975)           | La Leche                  | 150.00              | 6°30'00"       | 79°42'00"      |
| M3           | Puente La Leche (2015-2019)       | La Leche                  | 45.00               | 6°27'08"       | 79°51'04"      |

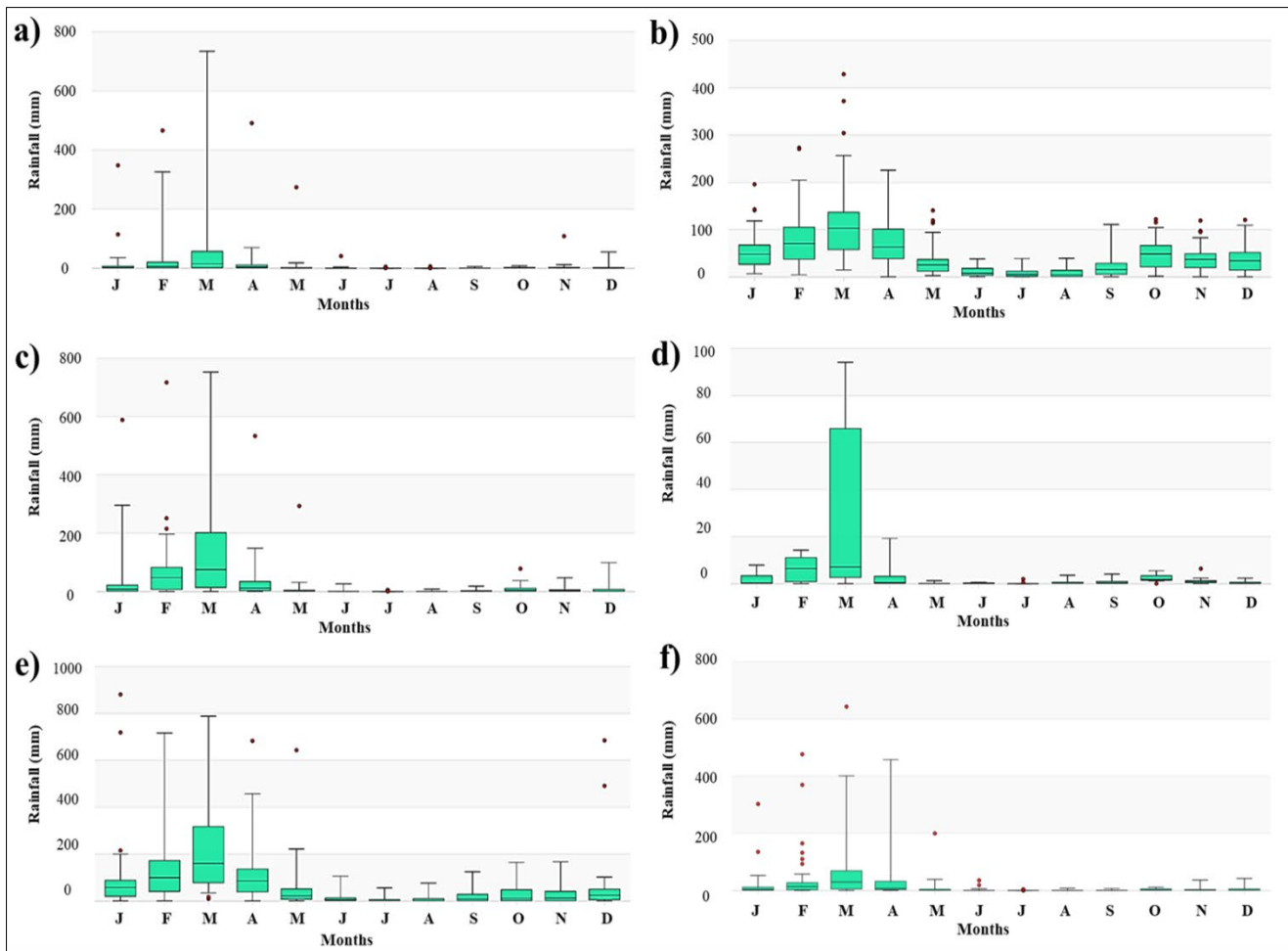


Figure 3. Box diagrams by month for each climatic station that registers rainfall: a) Jayanca, b) Incahuasi, c) Puchaca, d) Granja Militar Sasape, e) Toccoche and f) Tinajones

Another important aspect is the analysis of regional vector for the grouping of climatic stations according to the rainfall pattern (Arriola et al., 2022), since groups of stations can be conveniently formed in order to relate rainfall behavior in the La Leche basin. Therefore, this procedure is justified since, unlike other techniques, the regional vector has the particularity of considering a fictitious station, commonly called the vector index, which represents the average of all the other climatic stations. In that sense, it is possible to better represent a group of stations as homogeneous in relation to their location, altitude and rainfall within the basin or geographical area.

As indicated above, the regional vector was applied to La Leche basin, as shown in Figure 4, establishing two regional groups. The first group is made up of Granja Militar Sasape, Jayanca, Puchaca and Tinajones climatic stations, which are located in the lower-middle zone of the basin. While the second group 2, is made up of Incahuasi and Toemoche climatic stations, which are located in the upper part.

The comparison of the vector indices shows that in both groups there is a marked difference in terms of the years 1983, 1998 and 2017, where extreme events were directly related to the El Niño Phenomenon, as shown in their results by Arriola et al. (2022), Carrizales et al. (2022) and Peña et al. (2023).

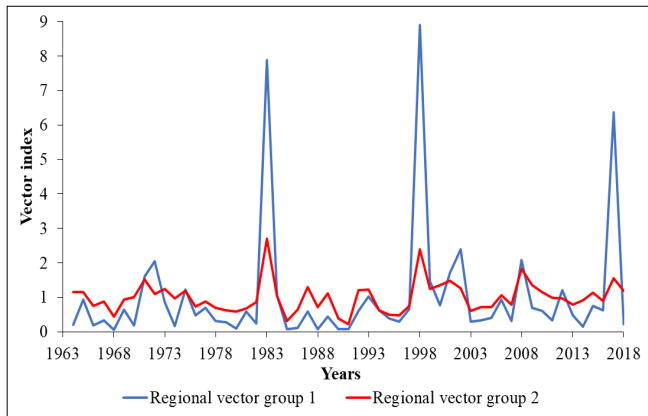


Figure 4. Regional vector for groups 1 and 2

Regarding the availability of hydrometric information, as mentioned above, the La Leche basin has three stations that record daily flows, whose distributions are shown in Figure 5. The Puchaca hydrometric station (Figure 5a) stands out for having a longer recording period than the other two stations. Because it is an important station not only for forecasting possible floods, but also for the use of water for irrigation purposes of the main crops in the Lambayeque Region, which is why it is always under constant maintenance.

In addition to the range of flows, a peak value close to 160 m<sup>3</sup>/s stands out as a result of the rains that occurred in 1998. In the case of the Desaguadero station (Figure 5b), there are only records up to the end of 1975 and they have consecutive peaks of up to 50 m<sup>3</sup>/s. Regarding the Puente La Leche station (Figure 5c), information is available since 2015. Consequently, only the extreme value recorded in mid-march of year 2017, whose maximum flow was 250 m<sup>3</sup>/s, is shown.

### 2.3 Methodology and application of Muskingum method

The methodology was of applied type and of comparative non-experimental design, since it sought to simultaneously examine similarities and differences in the generation of flows, both from historical records and those obtained through hydrological simulation with respect to those generated by the flood routing applying the Muskingum method for the La Leche basin.

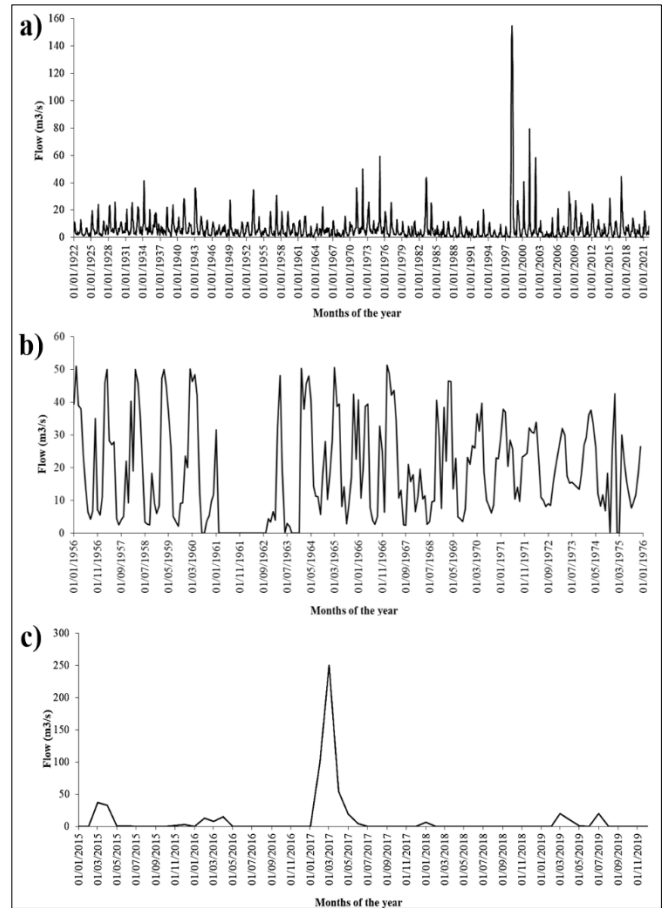


Figure 5. Historical record of flows of the hydrometric stations belonging to the La Leche basin: a) Puchaca, b) Desaguadero and c) Puente La Leche

The Muskingum method had its origin in the study and control of floods in the areas surrounding the Muskingum River and was proposed by The United States Army Corps of Engineers (USACE) in 1938, so it turned out to be a very practical and precise procedure for the evaluation of flood routing (Aboutalebi et al., 2016; Akbari et al., 2021).

In this context, the researchers Pazos & Mayorga (2019) indicate that this flood routing is also very simple, since it is developed by analyzing the total routing ( $S$ ) or also called as storage in a section of channel of a basin; which is affected by the volume proportionality constant in a certain interval of time ( $K_j$ ) and the weighting constant of routing along the river ( $X_j$ ).

The practical utility of this methodology is evident, for example, the catastrophic nature of a flood is directly related to the highest point of a hydrograph, so it is essential to

calculate how that peak flow decreases as it progresses in time. The basic expression of flood routing is described as shown in Equation (1), as stated by Ehteram et al. (2018); Alhumoud & Almashan (2019) and Arriola et al. (2021).

$$S = K_j * [X_j * I_j + (1 - X_j) * O_j] \quad (1)$$

Where  $S$  is the total routing,  $K_j$  is the volume proportionality coefficient,  $X_j$  is the weighting of routing along the river or section analyzed in the basin;  $I_j$  is the input flow and  $O_j$  is the output flow in a certain time interval ( $\Delta t$ ). Subsequently, the Muskingum method itself indicates the general formula for flood routing for flow generation, as indicated in Equation (2), which in turn considers three dimensionless constants called  $C_1$  (Equation 3),  $C_2$  (Equation 4) and  $C_3$  (Equation 5), it should also be noted that these constants when added must be equal to unity (Norouzi & Bazargan, 2022).

$$O_{j+1} = C_1 * I_{j+1} + C_2 * I_j + C_3 * O_j \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2 * K_j * X_j}{2 * K_j * (1 - X_j) + \Delta t} \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2 * K_j * X_j}{2 * K_j * (1 - X_j) + \Delta t} \quad (4)$$

$$C_3 = \frac{2 * K_j * (1 - X_j) - \Delta t}{2 * K_j * (1 - X_j) + \Delta t} \quad (5)$$

Where  $O_{j+1}$  is the outflow after the initial outflow and  $I_{j+1}$  is the inflow of the next position in the analysis of flood routing.

### 2.4 Hydrological modeling

The process known as rainfall-runoff is one of the most complex hydrological phenomena, however, when historical meteorological information is available, the simulation results are very useful for flood control and water resource planning (Rad et al., 2022; Sayed et al., 2023). Therefore, the hydrological modeling applied to the La Leche basin, was of the rainfall-runoff type, using the HEC-HMS software (Figure 6).

Then, the output hydrographs were obtained in each hydrometric station of the La Leche basin for the return periods of 5, 25, 50 and 100 years, and subsequently compare the flows simulation with respect to the flood routing equations using the Muskingum method.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

Regarding the results obtained from the parameters of Muskingum method per month and for each hydrometric station (Figure 7). It can be noted that in all cases, the highest values correspond to the parameter  $K_j$  reaching close to 1.00 and the lower range corresponded to  $X_j$  oscillating in 0.10. Likewise, the dimensionless constant  $C_2$  is the that present variation, reaching up to 0.44, while the constants  $C_1$  and  $C_3$  were around of 0.29.

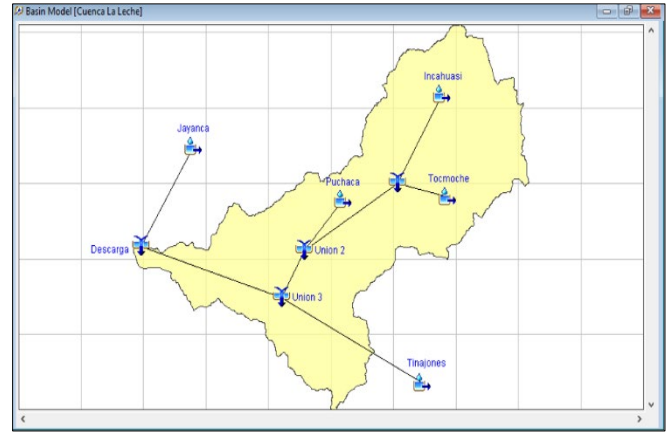


Figure 6. Hydrological modeling of the La Leche basin

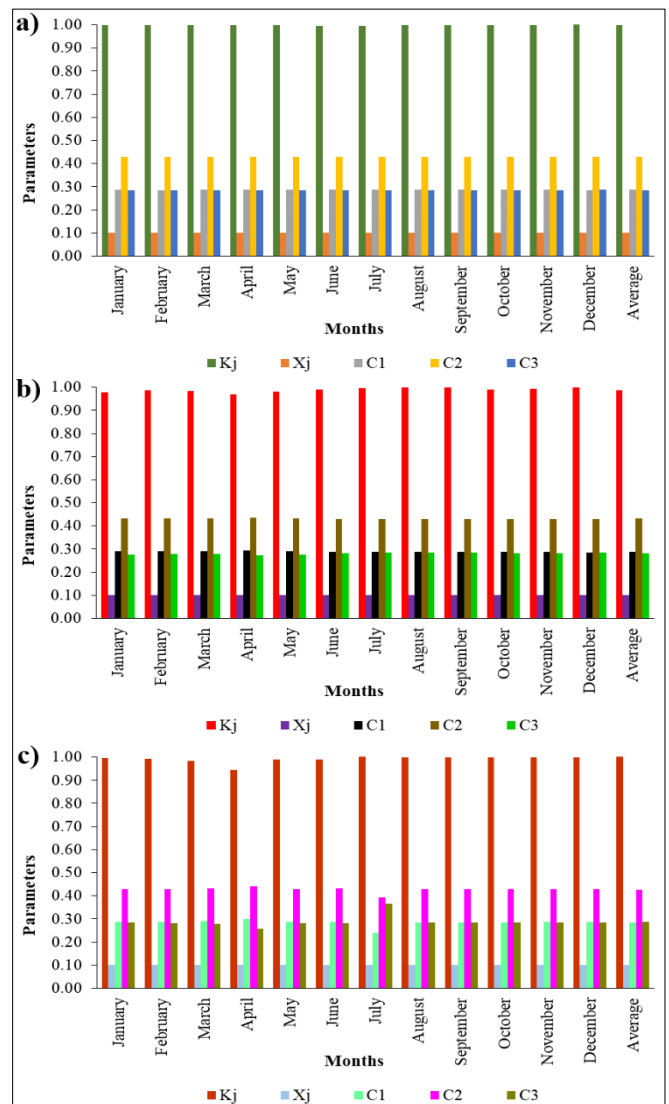


Figure 7. Parameters of Muskingum method for each month for hydrometric stations: a) Puchaca, b) Desaguadero and c) Puente La Leche

Subsequently, the general flow equations for each of the hydrometric stations were determined from the balance of the flow records and using the average parameters of Muskingum method to monthly level. The final Equations (6), (7) and (8) correspond to the Puchaca, Desaguadero and Puente La Leche stations, respectively.

$$O_{j+1} = 0.2861 * I_{j+1} + 0.4289 * I_j + 0.2851 * O_j \quad (6)$$

$$O_{j+1} = 0.2887 * I_{j+1} + 0.4310 * I_j + 0.2803 * O_j \quad (7)$$

$$O_{j+1} = 0.2843 * I_{j+1} + 0.4275 * I_j + 0.2882 * O_j \quad (8)$$

After obtaining the equations of Muskingum method, the flows were generated from the historical records available at each hydrometric station, for which it was necessary to use five statistical indicators to optimize their comparison (Table 2), achieving very significant results in each of the cases analyzed.

**Table 2.** Statistical indicators obtained at each hydrometric station of the La Leche basin

| Hydrometric station | Statistical indicator                           | Parameter | Value of the statistical indicator for the entire registration period | Value of the statistical indicator for each return period |          |          |           |
|---------------------|-------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------|----------|-----------|
|                     |                                                 |           |                                                                       | 5 years                                                   | 25 years | 50 years | 100 years |
| Puchaca             | Pearson correlation coefficient                 | <i>r</i>  | 0.966                                                                 | 1.000                                                     | 1.000    | 1.000    | 1.000     |
|                     | Schultz criterion                               | <i>D</i>  | 0.206                                                                 | 0.467                                                     | 0.487    | 0.442    | 0.412     |
|                     | Nash-Sutcliffe criterion                        | <i>E</i>  | 0.920                                                                 | 0.999                                                     | 0.999    | 0.999    | 1.000     |
|                     | Mass balance error                              | <i>m</i>  | 0.001                                                                 | 0.000                                                     | 0.000    | 0.000    | 0.000     |
|                     | t-test for two samples assuming equal variances | <i>p</i>  | 0.994                                                                 | 1.000                                                     | 1.000    | 1.000    | 1.000     |
| Desaguadero         | Pearson correlation coefficient                 | <i>r</i>  | 0.948                                                                 | 1.000                                                     | 1.000    | 1.000    | 1.000     |
|                     | Schultz criterion                               | <i>D</i>  | 2.622                                                                 | 0.467                                                     | 0.469    | 0.422    | 0.399     |
|                     | Nash-Sutcliffe criterion                        | <i>E</i>  | 0.884                                                                 | 0.999                                                     | 0.999    | 0.999    | 1.000     |
|                     | Mass balance error                              | <i>m</i>  | 0.000                                                                 | 0.000                                                     | 0.000    | 0.000    | 0.000     |
|                     | t-test for two samples assuming equal variances | <i>p</i>  | 0.942                                                                 | 1.000                                                     | 1.000    | 1.000    | 1.000     |
| Puente La Leche     | Pearson correlation coefficient                 | <i>r</i>  | 0.937                                                                 | 1.000                                                     | 1.000    | 1.000    | 1.000     |
|                     | Schultz criterion                               | <i>D</i>  | 1.487                                                                 | 0.475                                                     | 0.495    | 0.451    | 0.421     |
|                     | Nash-Sutcliffe criterion                        | <i>E</i>  | 0.849                                                                 | 0.999                                                     | 0.999    | 0.999    | 1.000     |
|                     | Mass balance error                              | <i>m</i>  | 0.001                                                                 | 0.000                                                     | 0.000    | 0.000    | 0.000     |
|                     | t-test for two samples assuming equal variances | <i>p</i>  | 1.000                                                                 | 1.000                                                     | 1.000    | 1.000    | 1.000     |

The statistical indicators applied in the present research are some of the most recommended for the evaluation and comparison of observed and calculated data, especially in cases where flows and precipitations from some hydrological modeling for basins are analyzed, as recommend Oñate-Valdivieso et al. (2016), Balcázar et al. (2019), Hernández-Romero et al. (2022) and Colín-García et al. (2023).

The Pearson correlation coefficient (*r*) was obtained by applying Equation (9):

$$r = \frac{n * \sum_{i=1}^n xy - \sum_{i=1}^n x * \sum_{i=1}^n y}{\sqrt{(n * \sum_{i=1}^n x^2 - (\sum_{i=1}^n x)^2) * (n * \sum_{i=1}^n y^2 - (\sum_{i=1}^n y)^2)}} \quad (9)$$

Where *n* represents the number of data from the respective hydrometric station, *x* represents the flows obtained with the Muskingum method, and *y* represents the flows recorded at said station.

The statistical indicator called the Schultz criterion (*D*) was obtained by applying Equation (10):

$$D = 200 * \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{sim} - Q_i| * Q_i}{n * (Q_{max})^2} \quad (10)$$

Where *Q<sub>sim</sub>* is the flow obtained with the Muskingum method of the respective hydrometric station, *Q<sub>i</sub>* is the flow registered in said station, *Q<sub>max</sub>* is the maximum flow of the historical record of said station and *n* is the available number of historical records of the respective station.

The statistical indicator called the Nash-Sutcliffe (*E*) criterion was determined by Equation (11):

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (11)$$

Where *Q<sub>sim</sub>* is the flow obtained with the Muskingum method of the respective hydrometric station, *Q<sub>i</sub>* is the flow registered in said station and  $\bar{Q}$  is the average flow of the historical record of the respective station.

Regarding the statistical indicator mass balance error (*m*), Equation (12) was applied:

$$m = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_i)}{\sum_{i=1}^n (Q_i)} \quad (12)$$

Where *Q<sub>sim</sub>* is the flow obtained with the Muskingum method of the respective hydrometric station and *Q<sub>i</sub>* is the flow rate recorded at that station.

The t-test for two samples assuming equal variances, as represented by Equation (13), was employed for statistical analysis.

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\left(\frac{(n_1-1)*S_x^2 + (n_2-1)*S_y^2}{n_1+n_2-2}\right) * \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \quad (13)$$

Where  $\bar{x}$  is the average value of the flows obtained with the Muskingum method in the respective hydrometric station,  $\bar{y}$  is the average value of the flows registered in said station, *n<sub>1</sub>* is the quantity of flows obtained with the Muskingum method in

said station,  $n_2$  is the quantity of flows registered in the respective station,  $S_x^2$  is the variance of the flows obtained with the Muskingum method and  $S_y^2$  is the variance of the flows registered in the respective station.

Also, Table 2 shows the values of the statistical indicators for each return period, which were established from the comparison of the flows of the output hydrographs of hydrological modeling in each hydrometric station in relation to the flows generated with the flood routing of Muskingum method to monthly level, which is consistent with what was done by Badfar et al. (2021), Alhumoud (2022), Kadhim et al. (2022) and Rad et al. (2022).

The results of these indicators generally show very good correspondences. The Pearson correlation coefficient ( $r$ ) had a minimum value of 0.937 and a maximum of 1.000 (very high to perfect correlation). Regarding the Schultz criterion ( $D$ ), it varied between 0.206 and 2.622 (very good correlation). For the Nash-Sutcliffe ( $E$ ) criterion, the range was from 0.849 to

1.000 (excellent correlation). In relation to the mass balance error ( $m$ ) it ranged from 0.000 to 0.502 (very good to perfect correlation). Finally, the ranges of the t-test for two samples assuming equal variances exceeded 5% of significance, as the values ranged from 0.942 to 1.000 (very significant equality of flows).

Consequently, these results of the statistical indicators point to the high accuracy that exists between the flows of the historical record of each station with respect to the generation of flows through the application of flood routing. These ranges are analogous with the results reported by Arriola et al. (2021) and Kadim et al. (2021).

Then, the flood routing distribution maps were generated (Figure 8), in order to adequately visualize the flow ranges obtained for the return periods of 5 years (Figure 8a), 25 years (Figure 8b), 50 years (Figure 8c) and 100 years (Figure 8d). An interpolation method based on inverse distance weighting (IDW) was used for this analysis (Wang et al., 2022).

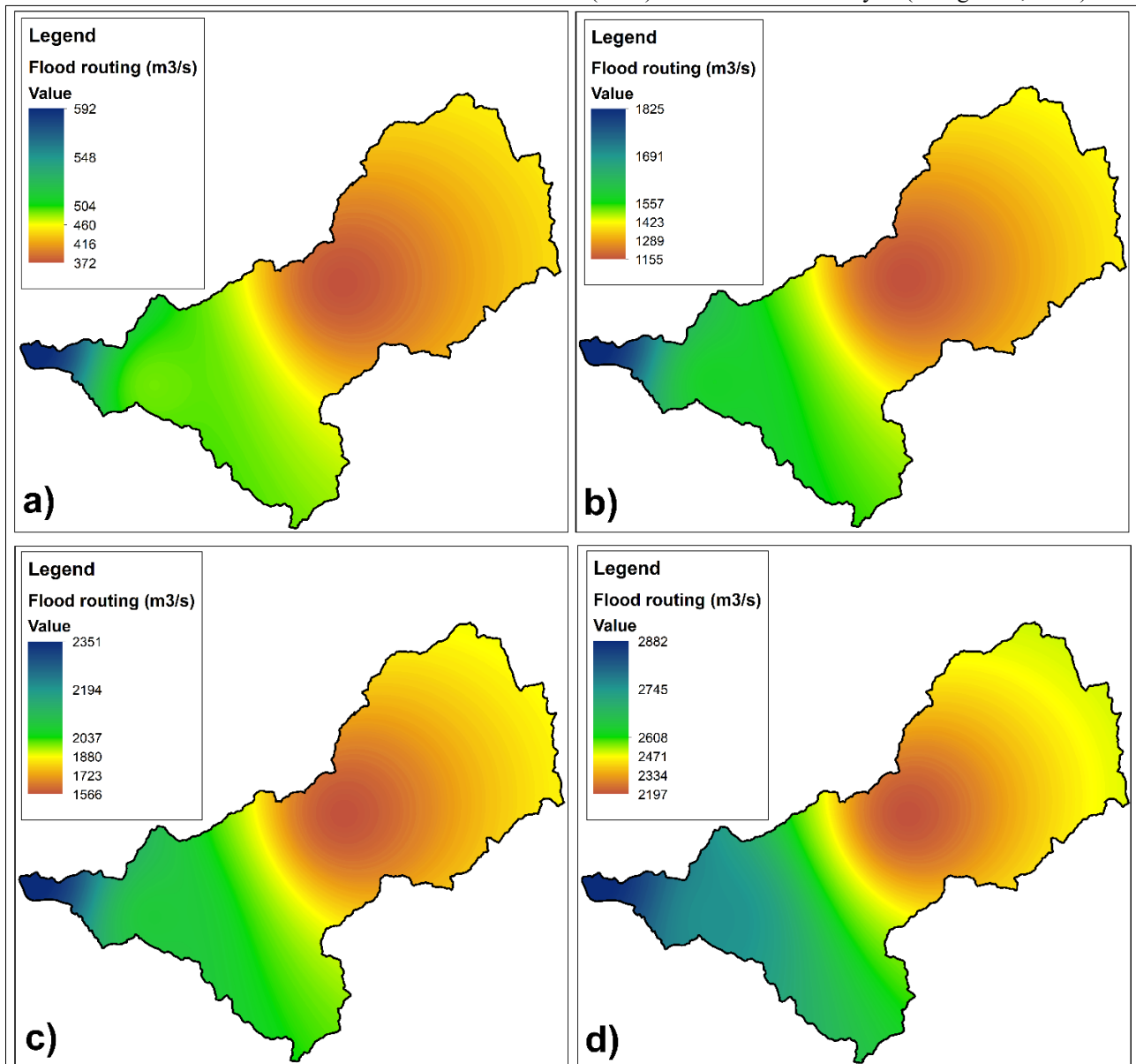


Figure 8. Flood routing generated from the monthly flows for the La Leche basin in different return periods: a) 5 years, b) 25 years, c) 50 years and d) 100 years

This IDW technique is appropriate when there is a need to quantify values in areas where data are not available, as it correlates them with stations that do have complete values, much wider ranges of the meteorological variable under study can be obtained (Arriola et al., 2022; Tan et al., 2021; Vargas et al., 2021). In addition, the application of IDW in the La Leche basin is justified because it is a simple and accurate methodology for determining the required flows and also, additional information is not needed beyond that available at each hydrometric station.

However, as could be observed in the previous findings, the interpolation with the IDW method cannot be exceeded for return periods of more than 100 years, since the flows in the lower zone tend to decrease. This is due to the fact that the "Puente La Leche" hydrometric station, which is located downstream, at the discharge point of the basin, has few years of records, which, unlike the other hydrometric stations, do present higher ranges of flow records. Therefore, an extension of the monthly flows applying the Muskingum method specifically in this area of the La Leche basin would represent a much greater extrapolation to the available data.

The results of flood routing for the La Leche basin, as shown in Figure 8, also indicate an increase in flow in an east to southwest direction as the return period progresses. This pattern is characteristic of the North Pacific basins of Peru, as reported by the investigations of Arriola et al. (2021), Rollenbeck et al. (2021) and Arriola et al. (2023). Furthermore, this sequence of hydrological behavior has been influenced in recent years by extreme events due to the El Niño Phenomenon (Aguirre et al., 2019; Carrizales et al., 2022; Peña et al., 2023).

On the other hand, these results confirm the findings by Tahiri et al. (2022) and Moradi et al. (2023), since, as demonstrated in the present investigation, the Muskingum method is an efficient technique in terms of flow generation from historical records available from hydrometric stations, especially in the data processing time, the application equations and flood routing estimation parameters.

#### 4. CONCLUSIONS

The flow data were generated by means of a simple flood routing using the Muskingum method to monthly level from the analysis of the information available of three hydrometric stations and hydrological modeling of the La Leche basin of Peru, whose comparison criteria were based on five statistical indices. This showed in all the cases studied very significant results and very good correlations, which leads to the conclusion that the method is valid for its application in various hydrographic basins.

The Muskingum method can also be used to validate simulated discharges in a basin, where meteorological and hydrometric information is available, from which maximum flows can be predicted for different return periods using the general equation of flood routing and their respective parameters, as it could be verified in the present investigation.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors of this article thank the SENAMHI and ANA institutions for providing complementary information related to the La Leche basin, Motupe basin and Chancay-Lambayeque basin of Peru. Also, a special thanks to Cesar Vallejo University and Lord of Sipan University for giving us free access to SCOPUS, Science Direct and IOP Science databases.

#### REFERENCES

- Aboutalebi, M., Haddad, O., & Loáiciga, H. (2016). Application of the SVR-NSGAI to hydrograph routing in open channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(3). [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000969](http://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000969)
- Aguirre, J., De La Torre Ugarte, D., Bazo, J., Quequezana, P., & Collado, M. (2019). Evaluation of early action mechanisms in Peru regarding preparedness for El Niño. *International Journal of Disaster Risk Science*, 10(4), 493-510. <http://doi.org/10.1007/s13753-019-00245-x>
- Akbari, R., Hessami-Kermani, M., & Shojaee, S. (2020). Flood Routing: Improving outflow using a new non-linear Muskingum model with four variable parameters coupled with PSO-GA algorithm. *Water Resources Management*, 34(10), 3291-3316. <http://doi.org/10.1007/s11269-020-02613-5>
- Akbari, R., & Hessami-Kermani, M. (2021). Parameter estimation of Muskingum model using grey wolf optimizer algorithm. *MethodsX*, 8. <http://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101589>
- Alhumoud, J. (2022). Analysis and evaluation of flood routing using Muskingum method. *Journal of Applied Engineering Science*, 20(4), 1366-1377. <http://doi.org/10.5937/jaes0-37455>
- Alhumoud, J., & Almashan, N. (2019). Muskingum method with variable parameter estimation. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 6(3), 355-362. <http://doi.org/10.18280/mmep.060306>
- Arriola, G., Villegas, L., Arbulú, J., & Sotomayor, G (2021). Estimación del tránsito de avenidas empleando el método de Muskingum en la estación El Tambo de la cuenca Chicama, Perú. *Revista Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 8(2), 15-29. <https://doi.org/10.26495/icti.v8i2.1901>
- Arriola, G., Villegas, L., Fernandez, J., Vallejos, J., & Idrogo, C. (2023). Assessment of parameters of the generalized extreme value distribution in rainfall of the Peruvian north. *Revista Politécnica*, 52(2), 99-112. <https://doi.org/10.33333/rp.vol52n2.10>
- Arriola, G., Villegas, L., Marín, N., Idrogo, C., Piedra, J., & Arbulú, J. (2022). Assessment of climatic aggressiveness and precipitation concentration in the Chancay-Lambayeque basin, Peru. *Revista Politécnica*, 50(2), 15-22. <https://doi.org/10.33333/rp.vol50n2.02>
- Ayala, I., Oré, J., Requena, D., Oré, R., Torres, E., & Montes, E. (2018). Flow routing in the natural channel of the Ichu river experimental basin through neural networks.

- Journal of Environmental Science and Engineering A*, (7), 387-403. <http://doi.org/10.17265/2162-5298/2018.10.001>
- Badfar, M., Barati, R., Dogan, E., & Tayfur, G. (2021). Reverse flood routing in rivers using linear and nonlinear Muskingum models. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 26(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002088](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002088)
- Balcázar, L., Bâ, K., Díaz-Delgado, C., Quentin, E., & Minga-León, S. (2019). Daily discharges modelling in a basin in southern Ecuador with precipitation and temperature estimated by satellite. *Agrociencia*, 53(4), 465-486. Retrieved from the SCOPUS database
- Bazargan, J., & Norouzi, H. (2018). Investigation the effect of using variable values for the parameters of the linear Muskingum method using the Particle Swarm Algorithm (PSO). *Water Resources Management*, 32(14), 4763-4777. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2082-6>
- Bozorg-Haddad, O., Abdi-Dehkordi, M., Hamed, F., Pazoki, M., & Loáiciga, H. (2019). Generalized storage equations for flood routing with nonlinear Muskingum models. *Water Resources Management*, 33(8), 2677-2691. <http://doi.org/10.1007/s11269-019-02247-2>
- Bozorg-Haddad, O., Mohammad-Azari, S., Hamed, F., Pazoki, M., & Loáiciga, H. (2020). Application of a new hybrid non-linear Muskingum model to flood routing. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 173(3), 109-120. <http://doi.org/10.1680/jwama.19.00075>
- Carrizales, J., Rodas, M., & Castillo, L. (2022). Analysis of human physical vulnerability using static equilibrium techniques of a hazard flood for the determination of unsafe areas in the city of Catacaos - Piura, Peru. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 958(1). <http://doi.org/10.1088/1755-1315/958/1/012024>
- Colín-García, G., Palacios-Vélez, E., Fernández-Reynoso, D. S., López-Pérez, A., Flores-Magdaleno, H., Ascencio-Hernández, R., & Canales-Islas, E. (2023). Hydrological modeling with the SWAT model using different spatial distributions of soil type in the Mixteco River basin. *Terra Latinoamericana*, 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1566>
- Ehteram, M., Othman, F., Yaseen, Z., Afan, H., Allawi, M., Malek, M., Ahmed, A., Shadid, S., Singh, V., & El-Shafie, A. (2018). Improving the Muskingum flood routing method using a hybrid of particle swarm optimization and bat algorithm. *Water (Switzerland)*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/w10060807>
- Farzin, S., Singh, V., Karami, H., Farahani, N., Ehteram, M., Kisi, O., Allawi, M., Mohd, N., & El-Shafie, A. (2018). Flood routing in river reaches using a three-parameter Muskingum model coupled with an improved bat algorithm. *Water (Switzerland)*, 10(9). <http://doi.org/10.3390/w10091130>
- Fenton, J. (2019). Flood routing methods. *Journal of Hydrology*, 570, 251-264. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.006>
- Gąsiorowski, D., & Szymkiewicz, R. (2020). Identification of parameters influencing the accuracy of the solution of the nonlinear Muskingum equation. *Water Resources Management*, 34(10), 3147-3164. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02599-0>
- Guachamín, W., Páez-Bimos, S., & Horna, N. (2019). Evaluación de productos IMERG V03 y TMPA V7 en la detección de crecidas caso de estudio cuenca del río Cañar. *Revista Politécnica*, 42(2), 37-48. <https://doi.org/10.33333/tp.vol42n2.942>
- Hernández-Andrade, A., & Martínez-Martínez, S. (2019). Flood routing on a reservoir: Hydrologic or hydraulic?. *Tecnología y Ciencia del Agua*, 10(6), 147-177. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-06-06>
- Hernández-Romero, P., Patiño-Gómez, C., Corona-Vásquez, B., & Martínez-Austria, P. (2022). Rainfall/runoff hydrological modeling using satellite precipitation information. *Water Practice and Technology*, 17(5), 1082-1098. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.048>
- Kadhim, M., Al-Bedyry, N., & Omran, I. (2022). Evaluation of flood routing models and their relationship to the hydraulic properties of the Diyala river red. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 961(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/961/1/012058>
- Kadim, M., Omran, I., & Al-Taai, A. (2021). Optimization of the nonlinear Muskingum model parameters for the river routing, Tigris river a case study. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 16(6), 649-656. <https://doi.org/10.18280/ijdne.160605>
- Kang, L., & Zhou, L. (2018). Parameter estimation of variable-parameter nonlinear Muskingum model using excel solver. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 121(5). <http://doi.org/10.1088/1755-1315/121/5/052047>
- Katipoğlu, O., & Sarıgöl, M. (2023). Coupling machine learning with signal process techniques and particle swarm optimization for forecasting flood routing calculations in the Eastern Black Sea Basin, Türkiye. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25496-6>
- Khalifeh, S., Esmaili, K., Khodashenas, S., & Khalifeh, V. (2020). Estimation of nonlinear parameters of the type 5 Muskingum model using SOS algorithm. *MethodsX*, 7. <http://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101040>
- Lee, E., Lee, H., & Kim, J. (2018). Development and application of advanced Muskingum flood routing model considering continuous flow. *Water (Switzerland)*, 10(6). <http://doi.org/10.3390/w10060760>
- Lavado, W., Labat, D., & Ronchail, J. (2013). Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon-Andes basin over the last 40 years (1965-2007). *Hydrological Processes*, 27(20), 2944-2957. <https://doi.org/10.1002/hyp.9418>
- Luna-Romero, A., Ramírez, I., Sánchez, C., Conde, J., Agurto, L., & Villaseñor, D. (2018). Distribución espacio-temporal de la precipitación en la cuenca del río Jubones, Ecuador: 1975-2013. *Scientia*



- Agropecuaria*, 9(1), 63-70. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.01.07>
- Matovelle, C., Heras, D., & Solano-Peláez, J. (2022). Imputation efficiency of missing rainfall data using computational tools in a river basin, Jubones-Ecuador. *Revista Politécnica*, 50(2), 23-30. <http://doi.org/10.33333/rp.vol50n2.03>
- Moradi, E., Yaghoubi, B., & Shabanlou, S. (2023). A new technique for flood routing by nonlinear Muskingum model and artificial gorilla troops algorithm. *Applied Water Science*, 13(2). <http://doi.org/10.1007/s13201-022-01844-8>
- Norouzi, H., & Bazargan, J. (2020). Flood routing by linear Muskingum method using two basic floods data using Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. *Water Resources Management*, 20(5), 1897-1908. <http://doi.org/10.2166/ws.2020.099>
- Norouzi, H., & Bazargan, J. (2022) Flood routing using the Muskingum-Cunge method and application of different routing parameters. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 47(4). <https://doi.org/10.1007/s12046-022-02049-0>
- Okkan, U., & Kirdemir, U. (2020). Locally tuned hybridized particle swarm optimization for the calibration of the nonlinear Muskingum flood routing model. *Journal of Water and Climate Change*, 11(1S), 343-358. <http://doi.org/10.2166/wcc.2020.015>
- Oñate-Valdivieso, F., Bosque-Sendra, J., Sastre-Merlin, A., & Ponce, V. (2016). Calibration, validation and evaluation of a lumped hydrologic model in a mountain area in Southern Ecuador. *Agrociencia*, 50(8), 945-963. Retrieved from the SCOPUS database
- Pashazadeh, A., & Javan, M. (2020). Comparison of the gene expression programming, Artificial Neural Network (ANN), and equivalent Muskingum inflow models in the flood routing of multiple branched rivers. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(3-4), 1349-1362. <http://doi.org/10.1007/s00704-019-03032-2>
- Pazos, M., & Mayorga, D. (2019). *Hidrología agrícola*. Babahoyo, Ecuador: Cidepro.
- Peña, O., More, M., Nima, R., & Marchan, H. (2023). Artificial neural network model for the prediction of the "El Niño" Phenomenon in the Region of Piura (Peru). *TECHNO Review. International Technology, Science and Society Review / Revista Internacional de Tecnología, Ciencia y Sociedad*, 13(4). <http://doi.org/10.37467/revtechno.v13.4815>
- Qiang, Z., Qiaoping, F., Xingjun, H., & Jun, L. (2020). Parameter estimation of Muskingum model based on whale optimization algorithm with elite opposition-based learning. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 780(2). <http://doi.org/10.1088/1757-899X/780/2/022013>
- Rad, S., Junfeng, D., Jingxuan, X., Zitao, L., Linyan, P., Wan, Z., & Lin, L. (2022). Lijiang flood characteristics and implication of karst storage through Muskingum flood routing via HEC-HMS, S. China. *Hydrology Research*, 53(12), 1480-1493. <http://doi.org/10.2166/nh.2022.060>
- Rollenbeck, R., Orellana-Alvear, J., Rodriguez, R., Macalupu, S., & Nolasco, P. (2021). Calibration of X-band radar for extreme events in a spatially complex precipitation region in north Peru: Machine learning vs. empirical approach. *Atmosphere*, 12(12). <http://doi.org/10.3390/atmos12121561>
- Sayed, B., Al-Mohair, H., Alkhayyat, A., Ramírez-Coronel, A., & Elshahabi, M. (2023). Comparing machine-learning-based black box techniques and white box models to predict rainfall-runoff in a northern area of Iraq, the Little Khabur river. *Water Science and Technology*, 87(3), 812-822. <http://doi.org/10.2166/wst.2023.014>
- SENAMHI. (2017). *Nota técnica N° 002: Atlas de erosión de suelos por regiones hidrológicas del Perú*. Lima, Perú: Dirección de Hidrología del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/261>
- Tahiri, A., Che, D., Ladeveze, D., Chiron, P., & Archimède, B. (2022). Network flow and flood routing model for water resources optimization. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06075-0>
- Tan, J., Xie, X., Zuo, J., Xing, X., Liu, B., Xia, Q., & Zhang, Y. (2021). Coupling random forest and inverse distance weighting to generate climate surfaces of precipitation and temperature with Multiple-Covariates. *Journal of Hydrology*, 598. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126270>
- Vargas, Z., Valdez, S., & Paredes-Tavares, J. (2021). Spatio-temporal interpolation of rainfall data in western Mexico. *2021 Mexican International Conference on Computer Science, ENC 2021*. <https://doi.org/10.1109/ENC53357.2021.9534803>
- Vatankhah, A. (2021). The lumped Muskingum flood routing model revisited: The storage relationship. *Hydrological Sciences Journal*, 66(11), 1625-1637. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1957475>
- Wang, Z., Wang, Z., Feng, P., Dong, Y., Zhang, Z., & Yang, Y. (2022). Study on applicability of remote sensing precipitation products in hilly-plain-wetland complex area of northeast China. *Water Supply*, 22(3), 3498 – 3507. <https://doi.org/10.2166/WS.2021.387>
- Zang, S., Li, Z., Yao, C., Zhang, K., Sun, M., & Kong, X. (2020). A new runoff routing scheme for Xin'anjiang model and its routing parameters estimation based on geographical information. *Water (Switzerland)*, 11(2), 1-18. <http://doi.org/10.3390/W12123429>
- Zheng, H., Sang, G., & Yan, C. (2018). Study on risk assessment method of mountain torrent disaster of Wendeng District. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 208(1). <http://doi.org/10.1088/1755-1315/208/1/012023>

**BIOGRAPHIES**



**Máximo, Caicedo.** Civil Engineer from the Cesar Vallejo University, Peru. He's a designer in civil engineering projects with an emphasis on hydraulic engineering and road projects.



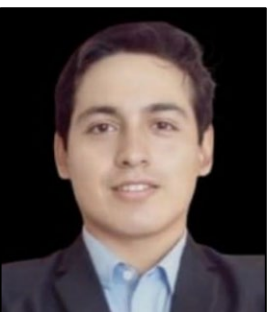
**Luis Mariano, Villegas,** Civil Engineer from the Pedro Ruiz Gallo National University, Peru. Master's Degree in Public and Educational Management from the Cesar Vallejo University, Peru. He has experience in Supervision and Residence of Civil Construction works, Designer and Consultant in civil engineering projects

with an emphasis on buildings and road works. Also, he has experience in the public sector as assistant manager in the Urbano-Rural area. Researcher, advisor and jury of undergraduate and postgraduate theses in road engineering, sanitation and construction.



**Guillermo, Arriola,** Civil Engineer from the Lord of Sipan University, Peru and with studies completed for a Master's degree in Road Engineering at the Ricardo Palma University, Peru. He's a designer and consultant in civil engineering projects with an emphasis on hydrology and hydraulic engineering. He has

experience in the calculation and design of works of art for roads, bridges, hydraulic works, hydrological and hydraulic modeling. Researcher and thesis advisor in hydraulic engineering, hydrology and related branches for undergraduates.



**Royser, Cayatopa,** Civil Engineer from the Lord of Sipan University, Peru. He's a designer and consultant in civil engineering projects. Researcher in hydraulic engineering and hydrology.



**Juan Martín, García,** Civil Engineer by the Universidad Señor de Sipan, pursuing a Master's degree in Geology at the Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Peru. Engineer dedicated to the area of research as a consultant and researcher in multidisciplinary civil engineering as concrete technology, geotechnics, soil

mechanics, seismic analysis of structures among other areas, experience in writing research reports, scientific articles and systematic review, in addition, he is a reviewer of indexed journals. Experience in supervision of educational infrastructure works and real estate projects at national level.



**Noe, Marín,** Civil Engineer from the Lord of Sipan University, Peru. Master in Civil Engineering with a mention in Structures from the Cesar Vallejo University, Peru. PhD in Science and Engineering from the National University of Trujillo, Peru. Professor at the Professional School of Civil Engineering of the Lord of

Sipan University and the Cesar Vallejo University. He currently works on calculating and designing reinforced concrete structures, as well as advising undergraduate research theses.

# Estimación, Manejo y Control de la Contaminación No Puntual por Escorrentía Superficial Ganadera: Una Revisión de literatura

Pérez-Sane, Monica<sup>1\*</sup> ; Torres, Camilo<sup>1</sup> ; Lara-Borrero, Jaime<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Pontificia Universidad Javeriana, Ingeniería, Bogotá, Colombia

**Resumen:** Los nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo generan, entre otros impactos, la eutrofización en los cuerpos de agua. Estos impactos son principalmente causados por actividades agrícolas como la ganadería, debido a la aplicación de fertilizantes y/o al estiércol de las vacas. Los nutrientes transportados por la escorrentía llegan a los cuerpos de agua y generan contaminación. Esta problemática ha sido abordada desde la década de los 60, no obstante, se ha logrado poco avance en este tema. Los avances están relacionados con la estimación del aporte de nutrientes de forma teórica y a través de simulaciones, debido a los altos costos que implica tomar datos en el campo. También se han realizado esfuerzos en la implementación de Buenas Prácticas de Gestión para el manejo de las fuentes no puntuales, pero existe poca evidencia de la eficiencia de cada una de estas prácticas. Por otro lado, pese a la falta de información científica necesaria para formular políticas, se ha demostrado que la vía normativa puede ser el mejor mecanismo para controlar la contaminación por fuentes no puntuales. En este artículo, se presenta una revisión de estos tres componentes luego del análisis bibliométrico, estableciendo lo que se conoce actualmente y las brechas de información. Primero, se abordan los avances en la estimación del aporte de las fuentes no puntuales, segundo se presentan las Buenas Prácticas de Gestión, y tercero, se exponen los avances en materia de políticas para el control de la contaminación no puntual.

**Palabras clave:** Nitrógeno, Fosforo, Fuentes No Puntuales, Ganadería, Buenas Prácticas de Gestión, Políticas Públicas

## Estimation, Management, and Control of Non-Point Source Pollution from Livestock Runoff: A Literature Review

**Abstract:** Nutrients, like nitrogen and phosphorus generate, among other impacts, eutrophication in water bodies. These impacts are mainly caused by agricultural activities such as livestock farming, due to the application of fertilizers and/or cow manure. The nutrients transported by runoff reach water bodies and generate pollution. This issue has been addressed since the 1960s; however, little progress has been made in this area. The progress is related to estimating nutrient contributions theoretically and through simulations, due to the high costs of collecting field data. Efforts have also been made to implement Good Management Practices for the management of non-point sources, but significant efficiency for each of these practices has not been demonstrated. On the other hand, despite the lack of necessary scientific information to formulate policies, it has been shown that the regulatory route can be the best mechanism for controlling non-point source pollution. This article presents a review of these three components after a bibliometric analysis, establishing what is currently known and the information gaps. First, advances in estimating the contributions of non-point sources are addressed, second Good Management Practices are presented, and third advances in policies for controlling non-point source pollution are discussed.

**Keywords:** Nitrogen, Phosphorus, Nonpoint Sources, Livestock, Best Management Practices, Public Policies

### 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de las aguas superficiales puede ser causada tanto por fuentes puntuales: descargas directas en los ríos,

como por fuentes no puntuales también conocidas como Nonpoint Source - NPS.

Según la Ley de Agua Limpia de los Estados Unidos (Clean Water Act - CWA), se define como fuentes no puntuales aquellas que no se consideran "fuentes puntuales". Estas

\* monica.perezs@javeriana.edu.co

Recibido: 14/08/2023

Aceptado: 01/12/2023

Publicado en línea: 09/02/2024

10.33333/tp.vol53n1.10

CC 4.0

fuentes no puntuales de contaminación se generan cuando ocurre la escorrentía de precipitaciones, ya sea por lluvia o por nieve, sobre la superficie de la tierra o a través de ella (EPA, 2013). Algunos ejemplos de las fuentes no puntuales incluyen: la escorrentía de la agricultura, la escorrentía de pastos y praderas, la escorrentía urbana de zonas sin alcantarillado, los lixiviados sépticos y la escorrentía de sistemas sépticos defectuosos, la escorrentía de minas abandonadas y la deposición atmosférica sobre la superficie del agua (Carpenter et al., 1998).

Los contaminantes asociados comúnmente con las fuentes no puntuales incluyen, nutrientes como el nitrógeno (N) y el fósforo (P), patógenos, sedimentos limpios, petróleo y grasa, sal y pesticidas (EPA, 2013). Concentraciones elevadas de nitrógeno (N) y fósforo (P) pueden tener consecuencias adversas en cuerpos de agua superficiales, afectando la vida acuática mediante la eutrofización, que resulta en la disminución de los niveles de oxígeno y la mortalidad de especies acuáticas. Según Geng & Sharpley (2019), la contaminación proveniente de fuentes no puntuales se ha convertido en la principal causa de eutrofización en la mayoría de los lagos y ríos. En un estudio realizado en China por Hou et al. (2022), se encontró que más del 60% de los lagos en ese país presenta problemas de eutrofización, y más del 50% del N y P presentes en estos cuerpos de agua se originan a partir de fuentes de contaminación no puntuales.

La ganadería es una de las principales actividades que aporta nutrientes al suelo, que se transportan a los cuerpos de agua por escorrentía. Varias investigaciones respaldan este punto. Sharara et al. (2017) sostienen que la concentración y consolidación de la producción ganadera se asocia con impactos adversos en la calidad del agua. Zhao et al. (2022) encontraron que los contaminantes por fuentes no puntuales provenientes de la agricultura y la ganadería son considerablemente mayores que los generados por los desechos industriales y las aguas residuales domésticas sin tratar.

Para abordar el problema de las fuentes no puntuales, es necesario comprender la fuente, el transporte y la concentración de los nutrientes que llegan a los cuerpos de agua. Factores como las características del suelo, las condiciones climáticas y las propiedades intrínsecas de los fertilizantes, el estiércol y los componentes del bosque (como material en descomposición) junto con el comportamiento y destino de los nutrientes transportados en el suelo, afectan significativamente los mecanismos de transporte en el suelo (Tanik et al., 2013). Además, las fuentes de contaminantes pueden ser esporádicas y difíciles de rastrear debido a las interacciones entre diversos procesos físicos y características del paisaje que cambian constantemente a lo largo del año (Ballantine & Davies-Colley, 2013). Desconocer esta dinámica es quizás lo que impide una comprensión más precisa de las fuentes no puntuales, así como su manejo y control.

En relación con los métodos para estimar la carga contaminante por fuentes no puntuales, algunos estudios se han enfocado en determinar esta carga de forma empírica y conceptual, mientras que otros han calculado la carga de estos nutrientes a través de datos bibliográficos, y pocos han determinado estos datos en campos.

Otros estudios han demostrado que el coeficiente de exportación propuesto por Jones (1996) es una herramienta

efectiva para la estimación de las cargas contaminantes de las fuentes no puntuales y es ampliamente utilizado (Yang et al., 2020). Sin embargo, es importante destacar que este modelo presenta algunas deficiencias, ya que no considera variaciones en la precipitación o la topografía (Chen et al., 2017) y transformaciones del contaminante (Tong et al., 2022).

Por otro lado, existen modelos mecanicistas que se acercan a la estimación de las cargas de las fuentes no puntuales y tienen en cuenta el transporte de estos nutrientes, así como la capacidad de simular escenarios de manejo de las fuentes no puntuales. No obstante, se enfrentan a dificultades en la calibración de los parámetros (Li et al., 2020), lo cual coincide con las observaciones de Zhao et al. (2022) sobre las limitaciones de los modelos debido a la precisión de los datos tomados en terreno. Además, Kanter et al. (2018) así como Zhang et al. (2022) señalan que muchos modelos existentes no generan una lista completa de resultados, carecen de alguna representación de procesos críticos, no calculan los resultados a través de las diferentes escalas y, con frecuencia, están diseñados para explorar escenarios de cambio de cobertura terrestre. Debido a estos vacíos en el conocimiento de cuanto es la carga contaminante de las fuentes no puntuales, se ha avanzado poco en su manejo y control. Dentro de las soluciones de manejo, las más destacadas son el establecimiento de políticas, las Mejores Prácticas de Gestión y los Sistemas de Tratamiento (Kanter et al., 2018; Zhang et al., 2022).

El objetivo del trabajo es revisar la literatura científica sobre la estimación, el manejo y el control de la contaminación no puntual por escorrentía superficial de actividades ganaderas, con el fin de identificar las principales fuentes, los métodos de medición y las estrategias de mitigación. Así, se pretende contribuir al conocimiento y la gestión ambiental de este tipo de contaminación, que afecta la calidad y la disponibilidad de los recursos hídricos.

## 2. METODOLOGÍA

Se realizó una revisión de la literatura científica de los últimos diez años en las bases de datos Web of Science y Scopus, y se utilizó la siguiente ecuación de búsqueda ("diffuse source\*" OR "Nonpoint source") AND (phosphorus OR Nitrogen OR nutrient\*) AND ("cattle raising" OR "Cattle Farming" OR cattle OR "Cattle waste" OR livestock) AND ("water contamination" OR "water quality") AND ("methodolog\*"). Posteriormente, se llevó a cabo un análisis bibliométrico utilizando la herramienta Bibliometrix.

Los resultados muestran que existen registros de publicaciones sobre la contaminación de ríos por fuentes no puntuales desde 1976, pero el número de estudios ha sido limitado. El máximo número de artículos publicados fue de 27 en el año 2012 (ver Figura 1). Esto puede atribuirse a la dificultad de estimar estas fuentes y a que la calidad del agua suele asociarse principalmente a fuentes puntuales y no a fuentes no puntuales. Por otra parte, es importante resaltar que los países que han realizado mayores investigaciones en este tema son Estados Unidos, China, Reino Unido y Alemania (ver Figura 2). Las instituciones que han publicado la mayor cantidad de artículos son Beijing Normal University, North Carolina State University, Tarleton State University y University of Florida (ver Figura 3). Las revistas donde se ha publicado un mayor número de investigaciones al respecto son Science of the Total

Environment, Water Science and Technology, Journal of Environmental Management y Journal of Environmental Quality y Journal of the American Water Resources Association (ver Figura 4).

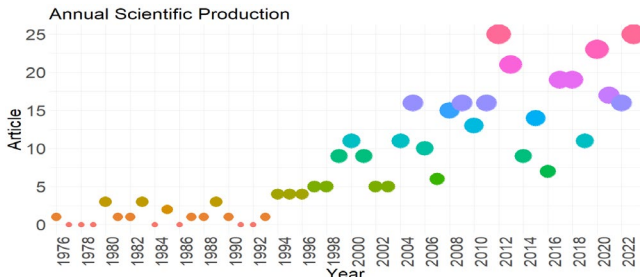


Figura 1. Producción Científica anual

Country Scientific Production

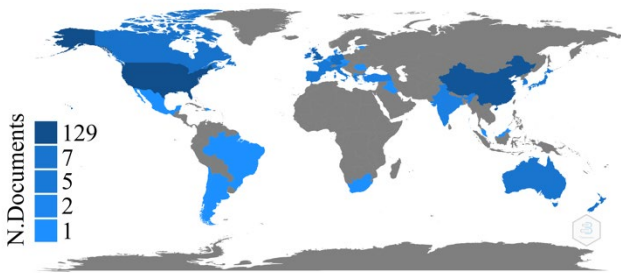


Figura 2. Producción científica por país

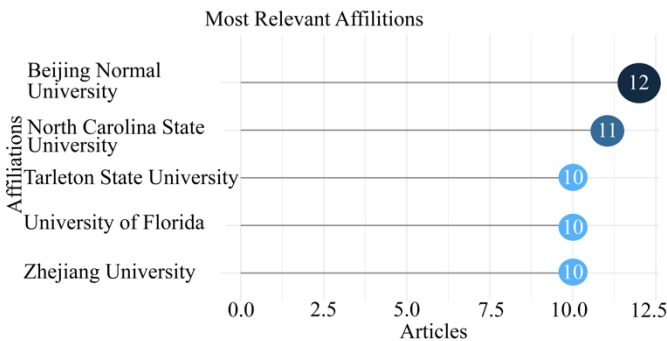


Figura 3. Instituciones con más producción científica

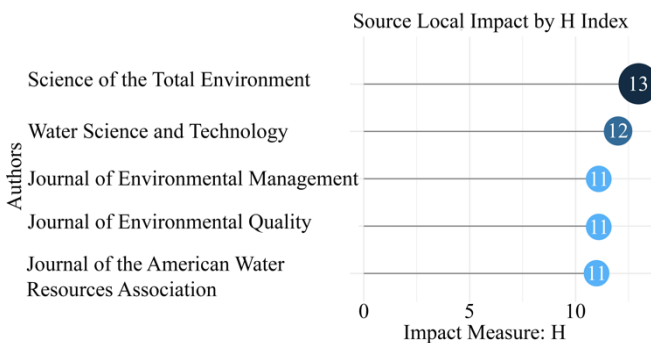


Figura 4. Revistas con mayor número de publicaciones

### 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1 Estimación de la Contaminación de Agua por Fuentes No Puntuales

Estimar la carga contaminante proveniente de fuentes no puntuales de contaminación de agua es una de las principales deficiencias para establecer el manejo y control de la contaminación de aguas superficiales generada por estas fuentes. El método de monitoreo de campo podría proporcionar resultados precisos de cargas de las fuentes no puntuales. Sin embargo, consume tiempo, dinero y mano de obra, lo que generalmente da como resultado la escasez de datos monitoreados, por lo que pueden ser ineficaces y limitados a gran escala (Xue et al., 2022). Ante esta condición, la simulación se convierte en una herramienta importante para estudiar los procesos de formación de la contaminación por fuentes no puntuales (Wu et al., 2012). Aunque los modelos no pueden reemplazar las mediciones reales, sirven como herramientas poderosas para comprender los procesos de contaminación por fuentes no puntuales y pueden brindar suficiente apoyo para la toma de decisiones (Wang et al., 2022).

En la actualidad, se han desarrollado diferentes métodos para estimar las cargas de contaminación por fuentes no puntuales. Según los métodos utilizados para cuantificar los procesos hidrológicos, los modelos de fuentes no puntuales se pueden clasificar en modelos estadísticos y modelos mecanicistas (Wang et al., 2022).

##### 3.1.2 Modelo Estadístico o Empírico

Los modelos empíricos utilizan el principio de la caja negra para evitar los procesos complejos asociados con el comportamiento de la contaminación por fuentes no puntuales (Chen et al., 2017). Los modelos empíricos se utilizan para describir la relación funcional entre distintas variables basándose en estadísticas. Para lograrlo, se requiere una cantidad considerable de datos para estas variables. Sin embargo, estos modelos son relativamente simples y directos, ya que suelen omitir las características específicas de la superficie subyacente del área de estudio. Esta simplicidad los hace altamente aplicables en áreas donde la disponibilidad de datos es limitada estadísticos (Wang et al., 2022)

El modelo de coeficiente de exportación, el modelo de pollution load - PLOAD y el modelo Spatially Referenced Regressions On Watersheds - SPARROW son comúnmente utilizados como modelos estadísticos (Wang et al., 2022). El método empírico más utilizado es el modelo de coeficiente de exportación - ECM (Yang et al., 2020).

##### 3.1.3 Modelo de Coeficiente de Exportación - ECM

El modelo empírico representado por el modelo de coeficiente de exportación se remonta a la década de 1970, cuando se estableció una relación entre la eutrofización de los lagos, la carga de nutrientes y el uso de la tierra en las cuencas hidrográficas (Vollenweider, 1968; White et al., 2015). El ECM combina métodos estadísticos con el principio de la caja negra para evitar el complejo proceso de ocurrencia y migración de la contaminación por fuentes no puntuales. Este modelo requiere menos parámetros, es simple de operar y presenta una precisión razonable (Guo et al., 2022). La precisión del ECM es respaldada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos - USEPA (White et al., 2015). En este método, la carga de nutrientes exportada desde una cuenca es la suma de las pérdidas de fuentes individuales,

como el uso de la tierra, la ganadería y la vida rural. Luego, se utilizan una combinación de experimentos de campo y estadísticas para dilucidar la relación entre las características de las fuentes y las concentraciones de contaminantes en el agua superficial, lo que resulta en la generación de un coeficiente para cada fuente (Chen et al., 2013).

El ECM propuesto por Johnes (1996) es el más clásico y ampliamente utilizado, y ha logrado resultados satisfactorios en muchas áreas de investigación a pequeña y mediana escala (Guo et al., 2022). En un estudio reciente titulado "Non-point source pollution loads estimation in Three Gorges Reservoir Area based on improved observation experiment and export coefficient model", se calcularon los coeficientes de exportación para diferentes tipos de uso de la tierra utilizando un método que combina consultas de literatura y un experimento de observación mejorado utilizando el ECM (Tong et al., 2022). Además, en China, (Chen et al., 2013) integraron este método junto con el modelo Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes - SLURP. Este modelo también se ha integrado con otros modelos como Soil & Water Assessment Tool – SWAT (Guo et al., 2022) y la Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE (Chen et al., 2017).

A pesar de su amplio uso, el modelo de coeficiente de exportación tradicional no representa adecuadamente la influencia de los factores de lluvia en la contaminación de fuente difusa (Tong et al., 2022), no tiene en cuenta las contribuciones de carga baja, como la deposición atmosférica, en los cálculos reales (Guo et al., 2022), e ignora los procesos complejos involucrados en la contaminación por fuente difusa (Chen et al., 2013). Además, no incluye todos los procesos críticos desde el origen del contaminante hasta su ingreso al río, no cuantifica el proceso de retención de contaminantes una vez que ingresan al río y utiliza el mismo valor de coeficiente de entrada para convertir la carga acumulada, ignorando las diferencias espaciales de estas áreas (Guo et al., 2022), no se puede aplicar a regiones con distribuciones desiguales de precipitación o terrenos variados y complejos, y no considera los efectos de la distancia y el terreno (Chen et al., 2017). Tampoco considera el proceso y el mecanismo interno de migración y transformación de contaminantes, y establece directamente la relación entre el uso del suelo y la producción de contaminación en función del coeficiente de salida del contaminante (Tong et al., 2022).

Sobre esta base, investigadores posteriores han realizado pequeñas mejoras al modelo (Ding et al., 2010; Soranno et al., 1996). En el estudio titulado "Research on the Non-Point Source Pollution Characteristics of Important Drinking Water Sources" realizado por Hou et al. (2022), se estableció un modelo de coeficiente de exportación modificado basado en la lluvia y el terreno para investigar las fuentes de contaminación y las características del nitrógeno total - N y el fósforo total - P. En la investigación "Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed" realizada por Chen et al. (2018), se modificó el ECM considerando las precipitaciones, la pendiente, la distancia entre las fuentes de contaminación y las masas de agua, así como otros factores relevantes. En el estudio "Non-point source nitrogen and phosphorus assessment and management plan with an improved method in data-poor regions" realizado por Chen et al. (2017), se mejoró el ECM al introducir el factor de impacto de la precipitación y el factor de impacto del terreno, los cuales se definieron para

caracterizar las no uniformidades de la precipitación y del terreno, respectivamente. En este mismo estudio, se reporta que Ding et al. mejoraron el ECM para analizar la distribución espacial de las cargas de nutrientes en el tramo superior del río Yangtze. Además, en el estudio "Development and test of the Export Coefficient Model in the Upper Reach of the Yangtze River. Journal of Hydrology," realizado por Ding et al. (2010), se desarrolló un método para determinar los coeficientes de exportación de los distintos tipos de uso del suelo utilizando datos hidrológicos y de calidad del agua.

El ECM sigue siendo una herramienta eficaz para evaluar las cargas de contaminación por fuentes no puntuales debido a la falta de series temporales de observación a largo plazo para la calibración de modelos mecanicistas en muchas aplicaciones prácticas (Chen et al., 2017).

### 3.1.4 Modelos Mecanicistas

Los modelos mecanicistas, también conocidos como el modelo basado en la física, se fundamentan en procesos hidrológicos, químicos y principios biológicos, y tienen como objetivo describir los procesos de migración y transporte de contaminantes. Este modelo, denominado "caja blanca" (Wang et al., 2022), puede describir con precisión el mecanismo de migración, el proceso de conversión y el complejo proceso de transmisión espaciotemporal de los contaminantes (Tong et al., 2022). Estos modelos estudian los mecanismos involucrados en la producción y transporte de heces (Yang et al., 2020), y pueden simular de manera más precisa situaciones básicas de la cuenca, como la hidrología de la superficie terrestre y la producción agrícola (Wang & Jin 2016 (Li et al., 2020), así como los procesos de transformación hidrodinámica y de calidad del agua dentro de los ríos (Liu et al., 2015). Estos utilizan la simulación continua del transporte de contaminantes, la transformación y la liberación para determinar el tiempo y la fuente de ocurrencia de la contaminación (Zhao et al., 2022).

Los modelos mecanicistas consideran muchos procesos y ayudan en la toma de decisiones, pero presentan dificultades, ya que requieren muchos datos de entrada. La baja precisión de los datos de entrada aumenta la incertidumbre en la estimación de la contaminación por fuentes no puntuales (Zhao et al., 2022), tal como también señalaron Chen et al. (2013), quienes indicaron que se necesitan muchos datos de entrada, incluyendo información topográfica en forma de un mapa de elevación digital, un mapa de suelos, información correspondiente sobre parámetros hidrológicos relevantes, un mapa de uso de la tierra, información sobre prácticas de cultivo, datos sobre precipitación, temperatura, ubicaciones y características de descarga de fuentes puntuales, e información de gestión sobre cuerpos de agua controlados artificialmente. Además, Zhang et al. (2022), explicaron que muchos de los modelos mecanicistas existentes no generan una lista completa de resultados, no representan procesos críticos, falta una base de evidencia empírica para combinaciones específicas o para todas las precipitaciones y tipos de suelo, no calculan los resultados en diferentes escalas y se diseñaron para explorar escenarios de cambio de cobertura terrestre, asumiendo que las interacciones entre las intervenciones se multiplican. Asimismo, Liu et al. (2015) identificaron que también existen dificultades en la calibración de los parámetros, como el uso

de la tierra, el suelo, la población, la cría de ganado y el uso de pesticidas y fertilizantes.

Entre los modelos mecanicistas más utilizados en los últimos diez años se pueden mencionar: Soil and Water Assessment – SWAT (Chen et al., 2020; Chen et al., 2023; Guo et al., 2022; Li et al., 2020), Modelo de distribución de la carga, Modelo de Sistemas de Captación – CSM (Zhang et al., 2022), Modelo de Sistema Agrícola Integrado – IFSM (Geng & Sharpley, 2019), Modelo Hidrológico del Proceso de Escorrentía del Uso de la Tierra Semidistribuido – SLURP (Chen et al., 2013; Wu et al., 2012), Modelling Nutrient Emissions in River Systems – Moneris (De Lima Barros et al., 2013). Según Liu et al. (2015), los modelos mecanicistas más utilizados hasta ese año eran: QUAL2K, WASP6, MIKE11, SWAT y AnnAGNPS. Actualmente, los modelos de cuencas hidrográficas más utilizados son: SWAT, HSPF (Hydrological Simulation Program FORTRAN) y AnnAGNPS (Wang et al., 2022).

#### 3.1.4.1 Soil and Water Assessment Tool - SWAT

El SWAT (Soil and Water Assessment Tool) fue desarrollado por el Dr. Jeff Arnold en colaboración con el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos - USDA-ARS y Texas A&M AgriLife Research, parte del Sistema Universitario de Texas A&M. El modelo se desarrolló con el objetivo de ayudar a los administradores de recursos hídricos a evaluar el impacto de la gestión en los suministros de agua y la contaminación proveniente de fuentes difusas (Fuentes No Puntuales) en cuencas hidrográficas y grandes cuencas (Arnold et al., 1998). El SWAT es un modelo utilizado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del uso de la tierra, las prácticas de gestión del suelo (Uribe, 2005). Esta herramienta es de gran importancia para entender y predecir el comportamiento de las cuencas hidrográficas, lo que brinda información valiosa para la toma de decisiones y la planificación adecuada de prácticas de manejo sostenible del agua y el suelo (Li et al., 2020).

De acuerdo con algunos estudios, SWAT se ha utilizado para simular el comportamiento de nutrientes provenientes de fuentes no puntuales, demostrando un buen desempeño en el análisis de fuentes de nutrientes y la interpretación de los procesos de transporte en áreas espacialmente heterogéneas de China y otros lugares donde predomina la agricultura. Además, SWAT puede estimar de manera exhaustiva los patrones de contribución de nutrientes de diversas fuentes de contaminación no puntual y simula las cargas de nutrientes y sedimentos en una cuenca hidrográfica bajo diferentes condiciones climáticas y de gestión agrícola (Amin et al., 2018). Estas aplicaciones de SWAT se han centrado principalmente en cuencas de zonas semiáridas o semihúmedas, regiones planas y áreas dominadas por tierras de cultivo (Chen et al., 2020).

Aunque el modelo mecanicista puede simular mejor la situación básica de la cuenca, presenta dificultades (Li et al., 2020). Se sabe poco sobre la capacidad de este modelo para proporcionar información sobre la escorrentía y los ciclos de nutrientes en las zonas montañosas monzónicas, caracterizadas por diversos tipos de uso de la tierra y la falta de información sistemática (Chen et al., 2020). Además, el modelo no considera la variabilidad de la cobertura vegetal

fraccional, ya que la considera homogénea o la ignora al estimar la contaminación por fuentes no puntuales en la escorrentía, lo que aumenta aún más la incertidumbre de los resultados (Zhao et al., 2022). Además, la calibración de los parámetros clave es un problema que limita el uso de SWAT debido a la escasez de datos confiables relacionados con el uso de la tierra, el suelo, la población, la cría de ganado, el uso de pesticidas y fertilizantes ((Amin et al., 2018; Arnold et al., 1998; Chen et al., 2020; Li et al., 2020; Liu et al., 2015; Zhao et al., 2022).

#### 3.1.4.2 Hydrological Simulation Program - FORTRAN (HSPF)

Hydrological Simulation Program FORTRAN - HSPF es un programa desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental - EPA de los Estados Unidos (EE. UU). Es un paquete integral para la simulación de la hidrología de cuencas hidrográficas y la calidad del agua, abarcando contaminantes orgánicos tóxicos y convencionales. Es el único modelo integral de hidrología de cuencas hidrográficas y calidad del agua que permite la simulación integrada de procesos de escorrentía de contaminantes del suelo y la tierra con interacciones hidráulicas y sedimentos químicos en la corriente (US EPA, 2015). En general, HSPF se utiliza para desarrollar cargas diarias máximas totales en apoyo de los esfuerzos regulatorios de la USEPA en relación con el control de la contaminación de fuentes puntuales y no puntuales en cuerpos de agua con calidad de agua deteriorada, según lo exige la Ley de Agua Limpia (Mohamoud & Prieto, 2012). Sin embargo, tiene algunas limitaciones. Shen et al. (2012) señalan que una de las mayores restricciones en la utilización del modelo HSPF para simular la contaminación por fuentes no puntuales es la escasez de datos observados, lo que afecta la precisión de los resultados simulados. Wang et al. (2015) encontraron que la incertidumbre generada por la lluvia y la entrada del Modelo Digital de Elevación se transfiere y se amplía a una incertidumbre aún mayor en el modelado del flujo de corriente.

Por otro lado, se han hecho comparaciones entre el modelo HSPF y otros modelos en diversos estudios. En un trabajo realizado por Bai et al. (2020), se emplearon los modelos de autómatas celulares (CA) y HSPF para investigar el mecanismo de respuesta de las cargas de contaminación no puntual frente al cambio de uso del suelo y diferentes escenarios de precipitación. Entre los resultados obtenidos, se encontró que el modelo HSPF fue capaz de predecir de manera precisa la respuesta de la carga de contaminación por fuentes no puntuales ante distintos escenarios de precipitación y uso del suelo. Además, tanto el modelo HSPF como el modelo CA demostraron ser altamente aplicables en la cuenca del río Dongjiang en China.

#### 3.1.4.3 Annualized Agricultural Non-Point Source - AnnAGNPS

El modelo Annualized Agricultural Non Point Source - AnnAGNPS (mejora de Agricultural Non-Point Source Pollution Model - AGNPS) es un modelo continuo y distribuido, desarrollado por el Departamento de Agricultura

de los Estados Unidos - USDA, que permite simular y evaluar las cantidades de rendimiento de escorrentía, sedimentos y nutrientes en una cuenca, según las especificaciones del usuario (JiaKe et al., 2009).

En un estudio realizado por T. Zhang et al. (2020), se adaptó y utilizó el modelo AnnAGNPS para evaluar la efectividad de las mejores prácticas de gestión en el control de la contaminación no puntual en el área del embalse de las Tres Gargantas, en China. La calibración de los parámetros del modelo y la validación de la simulación sugirieron que el modelo AnnAGNPS es adecuado tanto para la evaluación a largo plazo de los resultados de las fuentes no puntuales como para evaluar el efecto de reducción de las mejores prácticas de gestión. También, se compararon las simulaciones de los modelos AnnAGNPS y SWAT, y los resultados revelaron que ambos modelos son apropiados para simular la escorrentía, pero AnnAGNPS es más adecuado para simular el transporte de nutrientes en comparación con SWAT. Es importante destacar que el modelo AnnAGNPS requiere una gran cantidad de parámetros, lo que dificultó la recopilación de los datos necesarios en ese estudio y tuvo un impacto en la precisión de la simulación.

#### 3.1.4.4 Comparación entre modelos

##### SWAT-HSPF

Según Xie & Lian (2013) el modelo HSPF puede ofrecer un rendimiento superior al modelo SWAT en determinadas condiciones, siempre y cuando se logre identificar un conjunto "élite" de parámetros de calibración. La precisión que puede alcanzar el modelo HSPF depende en mayor medida de la eficacia del proceso de calibración. Por otro lado, el modelo SWAT presenta ventajas cuando los datos hidrológicos disponibles para la calibración son limitados o inexistentes. En situaciones en las que ambos modelos se ejecutan en modo no calibrado, se observa un rendimiento comparable entre el modelo SWAT y el HSPF en promedio, en sesgo en las descargas diarias y mensuales, y en el total acumulado durante varios años. En general, las predicciones del modelo SWAT resultan más eficientes porque los ajustes del modelo resultante presentan menos variabilidad.

##### SWAT- AnnAGNPS

En cuanto a la aplicabilidad de los modelos SWAT y AnnAGNPS en la región del Mediterráneo, Abdelwahab et al. (2018) concluyeron que ambos modelos pueden ser utilizados para estimar la carga de sedimentos e identificar áreas críticas de fuentes de sedimentos. Sin embargo, el modelo SWAT requiere más tiempo para su configuración debido a la gran cantidad de datos necesarios, como las prácticas de gestión. Por otro lado, en comparación con AnnAGNPS, SWAT ofrece la flexibilidad de elegir entre varios métodos para el cálculo de la escorrentía superficial y la evapotranspiración potencial. Este aspecto es especialmente relevante en áreas donde no se dispone de datos climáticos detallados, como la velocidad del viento diaria, la humedad relativa y la radiación solar. Además, a diferencia de AnnAGNPS, SWAT cuenta con herramientas automáticas como SWAT-CUP que facilitan el análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo. Cabe

mencionar que AnnAGNPS no simula el caudal base y puede subestimar el caudal diario en periodos sin precipitaciones.

#### 3.2. Manejo de las Fuentes No Puntuales de Contaminación

Las Mejores Prácticas de Gestión (Best Management Practice, BMP por sus siglas en inglés) se consideran un enfoque altamente efectivo para lograr un equilibrio en la gestión de la contaminación agrícola proveniente de las fuentes no puntuales (Geng & Sharpley, 2019).

##### 3.2.1 Best Management Practice - BMP

Desde 1985, la Ley de Seguridad Agrícola en los Estados Unidos introdujo las BMP, diseñadas específicamente para abordar los contaminantes como el nitrato, el fósforo y los pesticidas en las aguas agrícolas (Logan, 1993). Las BMP son "métodos y prácticas diseñadas para reducir o prevenir la contaminación del suelo y el agua sin afectar la productividad agrícola" (Logan, 1993). Entre los ejemplos de BMP se encuentran: los sistemas sin labranza, el establecimiento y mejora de la cubierta vegetal, las estructuras de control de agua y erosión, las casas apiladas de desechos animales, las zanjas ecológicas, los humedales construidos, los setos (Wu et al., 2013), las franjas de filtro, los canales de pasto, las terrazas, la planificación de la gestión de nutrientes, el almacenamiento de estiércol, la aplicación cuidadosa de estiércol y fertilizantes, los análisis regulares del suelo y el estiércol, la reducción de la labranza para disminuir las pérdidas de nutrientes en el borde del campo (Sharara et al., 2017), las vías fluviales con pasto, las cuencas de detención, la conversión de tierras de cultivo en bosques, el manejo de nutrientes del suelo, la labranza de conservación, la agricultura de contorno y el cultivo en franjas (Qiu et al., 2019) entre otros (Drizo et al., 2022). En Estados Unidos, estas BMP pueden ser empleadas como parte de programas regulatorios o voluntarios (EPA, 2013), aunque también ya se están aplicando en todo el mundo (Zhang et al., 2020).

Qiu et al. (2019) llevaron a cabo una evaluación de la eficiencia de las BMP utilizando el modelo SWAT. Encontraron que las tasas de eliminación de estas BMP oscilaron entre el 1,03% y el 38,40% para las cargas de nitrógeno total, y entre el 1,36% y el 39,34% para las cargas de fósforo total. La eficiencia de las BMP dependía de los parámetros de diseño y de los factores locales, y variaba en las diferentes subcuencas. Este estudio reveló que ninguna BMP por sí sola podría lograr los objetivos de mejora de la calidad del agua, resaltando la importancia de configurar óptimamente las combinaciones de BMP a nivel de subcuenca. Además, se encontró que las BMP estructurales, como las franjas de filtro, los cursos de agua con césped y los humedales construidos, mostraban una mayor eficiencia en la eliminación de contaminantes en comparación con las BMP no estructurales, como la gestión de residuos, la labranza de conservación y la gestión de nutrientes. El estudio realizado por Gao et al. (2023) empleó también el modelo SWAT para evaluar diversas buenas prácticas que contribuyen a mejorar la calidad del agua. Entre estas prácticas se destacan la reducción de fertilizantes químicos, la implementación de una gestión en la cría de ganado y la reconversión de tierras de cultivo en bosques. Comprobando que la adopción de estas medidas es efectiva



para remediar los problemas relacionados con la presencia de nitrógeno y fósforo en los cuerpos de agua.

Existen numerosas BMP propuestas para el manejo de la contaminación del agua por fuentes no puntuales. En este contexto, nos centraremos en las prácticas relacionadas con la gestión de las cargas contaminantes provenientes de actividades pecuarias. A continuación, se presenta una descripción general y los estudios realizados según la revisión realizada por Drizo et al. (2022).

### 3.2.1 Cría de animales

#### 3.2.1.1 Reducción dietética de la excreción de Nitrógeno (N) y Fósforo (P) (rumiantes y monogástricos)

Reducir los aportes y las exportaciones de nutrientes en la ganadería puede disminuir los requisitos totales de nutrientes y los depósitos reciclados en general. Aunque los datos son bastante limitados, las directrices de la Comisión Europea citaron una investigación para las típicas instalaciones de producción porcina danesas. Mediante el uso de dos mezclas de alimentos con contenido de nitrógeno - N diferente y la adición de aminoácidos sintéticos, la excreción de N por cerdo podría reducirse de 5,3 kg N a 3,9 kg N. Este estudio también sugirió que las emisiones de amoníaco también podrían reducirse en un 22%. Para todos los sistemas de cría de cerdos, se espera que la alimentación optimizada reduzca la excreción total de N en el estiércol en un 32%. Las pautas también sugieren que la alimentación optimizada (reducir la proteína cruda del 17% al 14% de la materia seca) en los sistemas lecheros del Reino Unido podría reducir la excreción general de N del ganado en aproximadamente 48 kg por vaca por año (Drizo et al., 2022).

#### 3.2.1.2 Manejo de alimentos - Filtros pasivos para retención de Fósforo en granjas

El sistema de filtro de retención de fósforo es un sistema de filtración pasivo alimentado por gravedad de "bucle cerrado" para la eliminación, recuperación y reutilización de fósforo - P como parte de una economía circular para un recurso tan limitado con costos crecientes y preocupaciones geopolíticas específicamente. En la última década de investigación en la Universidad de Vermont, Drizo desarrolló 6 filtros para mitigar la contaminación por nutrientes de los efluentes agrícolas concentrados, logrando eficiencias de eliminación de P de hasta el 90% de los efluentes (Drizo & Picard, 2012).

Bird y Drizo (2009) demostraron que es posible reciclar el P cosechado de los efluentes concentrados de las granjas lecheras mediante el uso de medios de filtración de P gastados, y utilizarlo como una enmienda del suelo de liberación lenta de P. Sin embargo, se requiere más investigación para explorar los métodos, costos y eficiencias de la recuperación de P, así como para cuantificar las cantidades de P que podrían ser recicladas y recuperadas (Drizo et al., 2022).

### 3.2.2 Gestión del estiércol

#### 3.2.2.1 Tratamiento Físico de Estiércol (Separación de Sólidos)

Las eficiencias de eliminación de sólidos a través de separadores mecánicos de estiércol sólido-líquido varían, pero los avances recientes en equipos y el uso de floculantes están mejorando este proceso. Las prensas de tornillo y la separación centrífuga por decantación pueden contribuir a reducir la pérdida de fósforo en los cuerpos de agua al eliminarlo. Se ha observado una reducción de hasta el 34% con las prensas de tornillo y de entre el 30% y el 93% con la centrífuga (aunque esto depende de diversos factores como la tecnología utilizada, el tipo de material, los productos químicos empleados, el funcionamiento del proceso y la máquina misma, entre otros). Sin embargo, el número de tecnologías y métodos aplicados en fincas a gran escala es muy limitado (Drizo et al., 2022). Vanotti et al. (2010) patentaron un proceso para recuperar fosfato del estiércol líquido porcino utilizando polímeros. Las prensas de tornillo se están volviendo cada vez más comunes en grandes explotaciones ganaderas, especialmente cuando existen presiones de nutrientes que fomentan la exportación de nutrientes desde la granja.

#### 3.2.2.2 Almacenamiento apropiado de estiércol sólido

Las unidades agrícolas de ganadería intensiva a menudo generan cantidades de estiércol que superan los requisitos de los cultivos locales y las áreas disponibles para su aplicación, lo que plantea desafíos significativos para el manejo adecuado de los nutrientes. En muchas áreas, el estiércol se almacena en pozos abiertos, lo que puede resultar en una contaminación significativa de fósforo debido a las lluvias (Drizo et al., 2022).

Las directrices de la Comisión Europea sugieren que la separación de los excrementos animales antes del almacenamiento es la mejor práctica para las granjas con sistemas de purines líquidos. Los propietarios de las granjas deben compostar o almacenar por lotes las fracciones sólidas resultantes de todos los sistemas de manejo del estiércol, especialmente el estiércol de corral y la cama de aves. Las instalaciones de almacenamiento de estiércol deben ubicarse en áreas bien drenadas y no deben permitir la entrada de agua superficial. Además, se debe establecer una franja de protección adecuada y efectiva entre la instalación de almacenamiento de estiércol y el curso de agua. Colocar las pilas de estiércol lejos de los desagües y cursos de agua reduce el riesgo de que el flujo preferencial de los efluentes a través del suelo transporte nitrógeno, fósforo y organismos indicadores de fecales a los cuerpos de agua cercanos (Drizo et al., 2022).

#### 3.2.2.3 Enmiendas inmovilizadoras de fósforo al suelo

La investigación sobre el uso de subproductos industriales y materiales naturales como materiales de retención de fósforo se inició en Europa a principios de la década de 1990. En Estados Unidos, la cal y el yeso se han utilizado durante varias décadas. Bryant y sus colaboradores desarrollaron "cortinas" de yeso, que consisten en zanjas llenas de yeso, para adsorber el fósforo soluble presente en la escorrentía. Este trabajo sugirió que la escorrentía de fósforo podría reducirse en un 50% y mantenerse así durante un período de hasta 10 años (Drizo et al., 2022). Uusitalo et al. (2012) investigaron los efectos del yeso en la transferencia de fósforo y otros nutrientes a través de monolitos de suelo arcilloso en

Finlandia. Los resultados de este estudio mostraron que los suelos enmendados con yeso experimentaron reducciones significativas en la turbidez (45%), fósforo particulado (70%), fósforo reactivo disuelto (50%) y carbono orgánico disuelto (35%). Los autores concluyeron que las enmiendas de yeso podrían tener el potencial de retardar la pérdida de fósforo en áreas agrícolas. Sin embargo, se necesita más investigación para identificar los materiales más adecuados, las cantidades necesarias, la durabilidad y el potencial de recuperación/reutilización del fósforo como fertilizante sostenible.

### 3.2.3 Sistemas basados en la naturaleza para fuentes de contaminación difusa (no puntual)

#### 3.2.3.1 Franjas de protección vegetativa (VBS)

Las franjas de protección vegetal (Vegetative Buffer Strips, VBS, por sus siglas en inglés), conocidas también como franjas de filtro, bloques de biofiltración, franjas de protección y zonas de protección, han sido ampliamente aceptadas como una práctica agrícola y una medida de mitigación común para prevenir la contaminación por nutrientes de fuentes de contaminación no puntuales en todo el mundo. En los países de la Unión Europea, se consideran obligatorias dentro del marco de la Política Agrícola Común. Sin embargo, se ha observado que la eficiencia de reducción de nutrientes varía considerablemente, desde valores negativos hasta casi el 100%, dependiendo de diversos factores, como: el ancho de la franja, la vegetación utilizada (especies de plantas), los nutrientes en cuestión, la carga de entrada, el clima, las condiciones hidrogeológicas locales y el tiempo transcurrido desde su instalación (madurez y establecimiento del cultivo). Es importante realizar inspecciones de las VBS después de fuertes lluvias o escurrimientos para detectar acumulación de escombros, basura y sedimentos. Igualmente, dependiendo del tipo de vegetación utilizada, también puede ser necesario realizar cosechas regulares para garantizar la extracción continua de fósforo por parte de los cultivos y evitar la acumulación excesiva de este nutriente en el suelo. (Drizo et al., 2022).

#### 3.2.3.2 Humedales para tratamiento

El uso de humedales para tratamiento en lugar de plantas de tratamiento de aguas residuales puede ser más eficaz y económico en muchos casos. Al diseñar estos humedales, se deben considerar parámetros importantes como la profundidad del filtro, el medio utilizado, el tiempo de retención hidráulica y la tasa de carga hidráulica. Para lograr una eliminación efectiva de nitratos a largo plazo en los sistemas de tratamiento, se requiere una variedad de medios de carbono en el lecho. Por lo tanto, se han estudiado diferentes tipos de medios de carbono, como serrín, paja de trigo y astillas de madera (Drizo et al., 2022).

Según Niu et al. (2013), los humedales de astillas de madera han demostrado ser efectivos en la reducción de nitrógeno a través de la nitrificación seguida de la desnitrificación. A medida que se incrementan los tiempos de retención y recirculación, se promueve la eliminación del nitrógeno. Las astillas de madera son eficaces para eliminar fósforo en aguas

pluviales de la ganadería, especialmente cuando se usan tiempos de retención más prolongados. Sin embargo, esto puede generar otros problemas, ya que las astillas de madera liberan materia orgánica, lo que inicialmente puede aumentar la concentración de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el efluente. Sin embargo, esta liberación puede mejorar y reducirse con tiempos de retención más prolongados.

### 3.3 Políticas para el Control de la Contaminación de Aguas por Fuentes No Puntuales

Debido a las limitaciones en la determinación de la carga contaminante de fuentes no puntuales, se amplía la brecha en el manejo y control. Por ejemplo, según Roygard et al. (2012), en Nueva Zelanda hay escasa información sobre las contribuciones específicas de diferentes fuentes de nutrientes a ríos y lagos, lo cual representa un problema crítico de información para los formuladores de políticas que buscan abordar el enriquecimiento de nutrientes. Los estudios se han centrado principalmente en lagos y concentraciones totales de nutrientes, dejando de lado los nutrientes solubles, más relevantes en el manejo de los nutrientes en los ríos. Esto supone un desafío mayor para el manejo de los cuerpos de agua superficiales en movimiento. Asimismo, Li et al. (2020) enfatizan que las fuentes no puntuales de contaminación tienen características de aleatoriedad, extensividad y largo período de latencia, lo que dificulta considerablemente la gobernanza.

A nivel mundial, son escasos los enfoques normativos para prevenir la contaminación proveniente de fuentes no puntuales. En Estados Unidos, en 1972 se aprobó una legislación federal (Ley Pública 92-500) que sometió a la autoridad reguladora a diversas formas de contaminación no puntual relacionadas con la agricultura (Sweeten & Reddell, 1976), debido a los problemas ambientales presentes en el agua y el suelo ocasionados por estas actividades, los cuales persisten hasta hoy. Actualmente, en Estados Unidos, la Ley de Agua Limpia, en su sección 319, exige que los estados, territorios y tribus desarrollen programas de manejo de la contaminación proveniente de fuentes no puntuales para poder recibir los correspondientes fondos (EPA, 2013). De esta manera, los operadores de grandes explotaciones ganaderas, conocidas como operaciones concentradas de alimentación animal - CAFO, deben obtener permisos de eliminación de descargas de contaminantes después de desarrollar un plan de manejo de nutrientes que incluya capacidad de almacenamiento de estiércol, disponibilidad de tierras y rotación de cultivos. Sin embargo, en muchos estados, las explotaciones ganaderas de pequeña y mediana escala aún no están obligadas a presentar planes de manejo de nutrientes (Sharara et al., 2017).

Skidmore et al. (2023) llevaron a cabo un estudio para evaluar la efectividad de las políticas diferenciadas en el estado de Wisconsin. En este estudio exhaustivo, se analizaron todas las ordenanzas existentes en los condados de Wisconsin. Los resultados revelaron que las cuencas hidrográficas que requerían que un mayor número de granjas presentaran un plan de gestión de nutrientes mostraban concentraciones más bajas de amoníaco y fósforo. Por otro lado, no se encontraron diferencias significativas en la calidad del agua en cuencas hidrográficas donde se implementaron otras regulaciones que no abordaban específicamente el manejo de estiércol. Esto

resalta la importancia de implementar políticas adecuadas y específicas para abordar los problemas ambientales, como la contaminación del agua.

Según Zhang et al. (2022), la investigación futura debe seguir explorando escenarios de intervención basados en mecanismos y considerar las prioridades emergentes de la política agrícola. Esto permitirá cumplir con los objetivos de calidad del agua, teniendo en cuenta las contribuciones combinadas de fuentes puntuales y no puntuales, para garantizar que el amoníaco y el nitrato no sean tóxicos para la vida acuática (Roygard et al., 2012).

Al establecer una política, es crucial integrar la evidencia actual y la opinión de expertos sobre la aplicabilidad y eficacia de las intervenciones en las fincas (Cuttle et al., 2016). Esto debe incluir aspectos como el acceso a tierras asequibles, asistencia técnica e incentivos financieros para facilitar la adopción a gran escala de prácticas de conservación ganadera, como la inyección de estiércol, la producción anual de ensilaje de invierno y los cultivos de cobertura (Amin et al., 2018). Además, se necesita una política diferenciada que logre los resultados ambientales requeridos al menor costo (Doole, 2012), así como mejores incentivos y estrategias para promover la adopción de prácticas de conservación de nutrientes (Stackpoole et al., 2019). Un ejemplo de este enfoque se encuentra en la Ley de Agua Limpia, donde una vez que se aprueba un programa estatal para fuentes no puntuales, la Agencia de Protección Ambiental - EPA otorga subsidios a estas entidades para implementar programas de gestión de fuentes no puntuales bajo la sección 319. Estos subsidios representan una fuente significativa de fondos para la implementación de programas de manejo de fuentes no puntuales, junto con otros programas federales, estatales, locales y privados, como la Ley Agrícola (EPA, 2013).

#### 4. CONCLUSIONES

Después de revisar la literatura de los últimos diez años sobre la estimación, el manejo y control de la contaminación por fuentes no puntuales generadas por la escorrentía superficial procedente de la ganadería, se pueden destacar las siguientes conclusiones:

La contaminación derivada de fuentes no puntuales, particularmente vinculada a actividades agrícolas como la ganadería, plantea un desafío significativo para preservar la calidad del agua. A pesar de que se reconoce el papel sustancial de la ganadería en la contaminación hídrica por nutrientes, existe una brecha en el conocimiento acerca de la magnitud precisa de esta contribución y cómo factores específicos, como la concentración y consolidación de la producción ganadera, inciden en la calidad del agua. Para lograr una comprensión integral y precisa de la dinámica de estas fuentes, es esencial considerar las interacciones con factores ambientales como: la vegetación, el suelo, el clima y la hidrología, así como la variabilidad espacial y temporal, los procesos físicos y las características del paisaje a lo largo del año. Este enfoque detallado podría resultar fundamental para la implementación de prácticas ganaderas más sostenibles.

Dentro de esta revisión del estado del arte, se destaca que una de las principales brechas de conocimiento es la dificultad para estimar la carga contaminante proveniente de fuentes no puntuales de contaminación de agua. El método de monitoreo de campo se menciona como una forma precisa de obtener datos sobre las cargas de fuentes no puntuales. Sin embargo, este enfoque tiene limitaciones importantes, como la inversión de tiempo, costos económicos y uso intensivo de mano de obra. Estas limitaciones resultan en la escasez de datos monitoreados, lo que puede hacer que los resultados sean ineficaces y limitados a gran escala. Ante las limitaciones del monitoreo de campo, se destaca que la simulación se convierte en una herramienta importante para estudiar los procesos de formación de la contaminación por fuentes no puntuales.

Los modelos estadísticos, como el Modelo de Coeficiente de Exportación, son herramientas apropiadas para la determinación del contenido de contaminantes en fuentes no puntuales. No obstante, se destacan diversas limitaciones, tales como la falta de representación adecuada de factores como la lluvia, la omisión de contribuciones de carga baja, como la deposición atmosférica, la aplicación restringida en regiones con distribuciones desiguales de precipitación o terrenos variados y complejos, las diferencias espaciales, ignorando los efectos de la distancia y el terreno. Además, utilizan un valor constante de coeficiente de entrada para convertir la carga acumulada, lo que desatiende las variaciones espaciales en diferentes áreas y no cuantifica los procesos críticos desde el origen del contaminante hasta su ingreso al río. Tampoco abordan de manera adecuada el proceso y mecanismo interno de migración y transformación de contaminantes, estableciendo directamente la relación entre el uso del suelo y la producción de contaminación sin considerar dicho proceso interno. Aunque se mencionan mejoras posteriores realizadas por investigadores al Modelo de Coeficiente de Exportación, estas mejoras son aún limitadas y sugieren la necesidad de una atención continua y desarrollo para abordar las limitaciones existentes y mejorar la aplicabilidad del modelo en diversas condiciones y situaciones. Para lograr resultados más precisos con modelos empíricos, es importante continuar mejorando estos modelos mediante la incorporación de variables adicionales como la topografía, la estacionalidad, los aportes de carga baja, la acumulación del contaminante en el área y la temporalidad. Esto asegurará una evaluación más completa y detallada de los procesos asociados con la contaminación por fuentes no puntuales, mejorando así la eficacia y aplicabilidad de estos modelos en diversos entornos.

Los modelos mecanicistas enfrentan desafíos significativos ya que demandan una gran cantidad de datos de entrada para llevar a cabo una calibración y simulación precisa. La baja precisión en estos datos de entrada puede incrementar la incertidumbre en las estimaciones de contaminación, especialmente cuando se trata de fuentes no puntuales. De igual forma, la incapacidad para representar la variabilidad en la cobertura vegetal fraccional contribuye a la incertidumbre en los resultados. El modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) ha sido ampliamente utilizado en este contexto. Sin embargo, la elección entre modelos los modelos mecanicistas dependen de condiciones específicas y de la disponibilidad de datos hidrológicos para la calibración. La precisión y eficiencia de los modelos están intrínsecamente vinculadas a

la calidad de los datos utilizados en su ajuste. Cerrar la brecha relacionada con la escasez de datos confiables sería crucial para mejorar la efectividad de la determinación de la contaminación no puntual a gran escala mediante modelos mecanicistas. La disponibilidad de datos más precisos permitiría una calibración más exacta, mejorando así la capacidad predictiva de estos modelos en el estudio y gestión de la contaminación en cuencas hidrográficas.

Aunque se menciona que las Mejores Prácticas de Gestión (BMP) son consideradas altamente efectivas, se necesita una comprensión más detallada de por qué ciertos tipos de BMP son más efectivos que otros y cómo se pueden optimizar para abordar diferentes tipos de contaminantes. La eficiencia de las BMP está intrínsecamente ligada a los parámetros de diseño y a los factores locales, mostrando variaciones significativas entre diferentes subcuencas. Esta variabilidad resalta la importancia de profundizar en la comprensión de cómo las condiciones locales influyen en la eficacia de las BMP, evidenciando una brecha en la aplicación de estas prácticas en diversos contextos geográficos y ambientales. Por eso, se requiere continuar avanzando en investigaciones que identifiquen las mejores prácticas de gestión, para implementarlas, evaluar su eficacia y diseñar manuales técnicos que orienten en la construcción, operación y mantenimiento de estas. Asimismo, es necesario superar las limitaciones económicas, la complejidad operativa y las barreras políticas en la implementación de las BMP.

Aunque existen regulaciones en Estados Unidos y China, a nivel mundial se señala la escasez de enfoques normativos para prevenir la contaminación proveniente de fuentes no puntuales. Esta carencia destaca una brecha en la regulación global de este tipo de contaminación, posiblemente debido a la falta de información detallada sobre las contribuciones específicas de diversas fuentes de nutrientes a ríos y lagos. Este vacío informativo representa un desafío para los formuladores de políticas. Además, subraya la necesidad de establecer políticas diferenciadas que logren resultados ambientales al menor costo, así como la implementación de incentivos y estrategias más efectivas para fomentar la adopción de prácticas de conservación de nutrientes. Esta situación resalta la importancia de desarrollar estrategias flexibles y adaptadas a distintos contextos.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación por su apoyo a través del Programa de Becas Bianuales Plan-Excelencia en el estudio doctoral del primer autor.

## REFERENCIAS

- Abdelwahab, O. M. M., Ricci, G. F., De Girolamo, A. M., & Gentile, F. (2018). Modelling soil erosion in a Mediterranean watershed: Comparison between SWAT and AnnAGNPS models. *Environmental Research*, 166, 363-376. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.029>
- Amin, M. G. M., Karsten, H. D., Veith, T. L., Beegle, D. B., & Kleinman, P. J. (2018). Conservation dairy farming impact on water quality in a karst watershed in northeastern US. *Agricultural Systems*, 165, 187-196. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.06.010>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Bai, X., Shen, W., Wang, P., Chen, X., & He, Y. (2020). Response of Non-point Source Pollution Loads to Land Use Change under Different Precipitation Scenarios from a Future Perspective. *Water Resources Management*, 34(13), 3987-4002. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02626-0>
- Ballantine, D. J., & Davies-Colley, R. J. (2013). Nitrogen, phosphorus and E. coli loads in the Sherry River, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 47(4), 529-547. <https://doi.org/10.1080/00288330.2013.815640>
- Bird, S. C., & Drizo, A. (2009). Investigations on phosphorus recovery and reuse as soil amendment from electric arc furnace slag filters. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 44(13), 1476-1483. <https://doi.org/10.1080/10934520903217922>
- Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559-568. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0559:NPOSWW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2)
- Chen, D., Li, H., Zhang, W., Pueppke, S. G., Pang, J., & Diao, Y. (2020). Spatiotemporal Dynamics of Nitrogen Transport in the Qiandao Lake Basin, a Large Hilly Monsoon Basin of Southeastern China. *Water*, 12(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/w12041075>
- Chen, H., Teng, Y., & Wang, J. (2013). Load estimation and source apportionment of nonpoint source nitrogen and phosphorus based on integrated application of SLURP model, ECM, and RUSLE: A case study in the Jinjiang River, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(2), 2009-2021. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2684-z>
- Chen, L., Wang, Y., Yang, N., Zhu, K., Yan, X., Bai, Z., Zhai, L., & Shen, Z. (2023). Improving crop-livestock integration in China using numerical experiments at catchment and regional scales. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 341, 108192. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108192>
- Chen, X., Liu, X., Peng, W., Dong, F., Huang, Z., & Wang, R. (2017). Non-point source nitrogen and phosphorus assessment and management plan with an improved method in data-poor regions. *Water (Switzerland)*, 10(1). Scopus. <https://doi.org/10.3390/w10010017>
- Chen, X.-K., Liu, X.-B., Peng, W.-Q., Dong, F., Huang, Z.-H., Feng, S.-X., & Wang, R.-N. (2018). Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed. *Huanjing Kexue/Environmental Science*, 39(1), 77-88. Scopus. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.201705061>

- De Lima Barros, A. M., Do Carmo Sobral, M., & Gunkel, G. (2013). Modelling of point and diffuse pollution: Application of the Moneris model in the Ipojuca river basin, Pernambuco State, Brazil. *Water Science and Technology*, 68(2), 357-365. Scopus. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.086>
- Ding, X., Shen, Z., Hong, Q., Yang, Z., Wu, X., & Liu, R. (2010). Development and test of the Export Coefficient Model in the Upper Reach of the Yangtze River. *Journal of Hydrology*, 383(3), 233-244. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.039>
- Doole, G. J. (2012). Cost-effective policies for improving water quality by reducing nitrate emissions from diverse dairy farms: An abatement-cost perspective. *Agricultural Water Management*, 104, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.11.007>
- Drizo, A., Johnston, C., & Guðmundsson, J. (2022). An Inventory of Good Management Practices for Nutrient Reduction, Recycling and Recovery from Agricultural Runoff in Europe's Northern Periphery and Arctic Region. *Water*, 14(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/w14132132>
- Drizo, A., & Picard, H. (2012). *Systems and methods for removing phosphorous from wastewater* (United States Patent US20120048806A1). <https://patents.google.com/patent/US20120048806A1/en/und>
- EPA. (2013). *Introducción a la Ley de Agua Limpia*. United States Environmental Protection Agency. [https://cfpub.epa.gov/watertrain/pdf/modules/Introduccion\\_a\\_la\\_Ley\\_de\\_Agua\\_Limpia.pdf](https://cfpub.epa.gov/watertrain/pdf/modules/Introduccion_a_la_Ley_de_Agua_Limpia.pdf)
- Gao, W., Dai, A., Wu, J., Li, Y., Hou, J., Wang, X., & Li, K. (2023). Hydrological status of the Dagu River Basin and management suggestions based on soil and water assessment tool multi-station calibration. *Applied Water Science*, 13(4), 97. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01900-x>
- Geng, R., & Sharpley, A. N. (2019). A novel spatial optimization model for achieve the trad-offs placement of best management practices for agricultural non-point source pollution control at multi-spatial scales. *Journal of Cleaner Production*, 234, 1023-1032. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.277>
- Guo, Y., Wang, X., Melching, C., & Nan, Z. (2022). Identification method and application of critical load contribution areas based on river retention effect. *Journal of Environmental Management*, 305, 114314. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114314>
- Hou, L., Zhou, Z., Wang, R., Li, J., Dong, F., & Liu, J. (2022). Research on the Non-Point Source Pollution Characteristics of Important Drinking Water Sources. *Water*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/w14020211>
- JiaKe, L., HuaiEn, L., & YaJiao, L. (2009). Development of study on AnnAGNPS model and its application. *Journal of Northwest A & F University - Natural Science Edition*, 37(2), 225-234.
- Johnes, P. J. (1996). Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: The export coefficient modelling approach. *Journal of Hydrology*, 183(3), 323-349. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02951-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02951-6)
- Kanter, D. R., Musumba, M., Wood, S. L. R., Palm, C., Antle, J., Balvanera, P., Dale, V. H., Havlik, P., Kline, K. L., Scholes, R. J., Thornton, P., Tittone, P., & Andelman, S. (2018). Evaluating agricultural trade-offs in the age of sustainable development. *Agricultural Systems*, 163, 73-88. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.010>
- Li, A.-L., Haitao, C., Yuanyuan, L., Qiu, L., & Wenchuan, W. (2020). Simulation of nitrogen pollution in the Shanxi Reservoir watershed based on SWAT model. *Nature Environment and Pollution Technology*, 19(3), 1265-1272. Scopus. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2020.v19i03.042>
- Liu, X., Li, D., Zhang, H., Cai, S., Li, X., & Ao, T. (2015). Research on Nonpoint Source Pollution Assessment Method in Data Sparse Regions: A Case Study of Xichong River Basin, China. *ADVANCES IN METEOROLOGY*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/519671>
- Logan, T. J. (1993). Agricultural best management practices for water pollution control: Current issues. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 46(1), 223-231. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(93\)90026-L](https://doi.org/10.1016/0167-8809(93)90026-L)
- Mohamoud, Y. M., & Prieto, L. M. (2012). Effect of Temporal and Spatial Rainfall Resolution on HSPF Predictive Performance and Parameter Estimation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(3), 377-388. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000457](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000457)
- Niu, S., Guerra, H. B., Chen, Y., Park, K., & Kim, Y. (2013). Performance of a vertical subsurface flow (VSF) wetland treatment system using woodchips to treat livestock stormwater. *Environmental Sciences: Processes and Impacts*, 15(8), 1553-1561. Scopus. <https://doi.org/10.1039/c3em00107e>
- Qiu, J., Shen, Z., Chen, L., & Hou, X. (2019). Quantifying effects of conservation practices on non-point source pollution in the Miyun Reservoir Watershed, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(9), 582. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7747-y>
- Roygard, J. K. F., McArthur, K. J., & Clark, M. E. (2012). Diffuse contributions dominate over point sources of soluble nutrients in two sub-catchments of the Manawatu River, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 46(2), 219-241. <https://doi.org/10.1080/00288330.2011.632425>
- Sharara, M., Sampat, A., Good, L., Smith, A., Porter, P., Zavala, V., Larson, R., & Runge, T. (2017). Spatially explicit methodology for coordinated manure management in shared watersheds. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT*, 192, 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.033>
- Shen, Z., Liao, Q., Hong, Q., & Gong, Y. (2012). An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China. *Separation and Purification Technology*, 84, 104-111. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.01.018>

- Skidmore, M., Andarge, T., & Foltz, J. (2023). Effectiveness of local regulations on nonpoint source pollution: Evidence from Wisconsin dairy farms. *American Journal of Agricultural Economics*, *n/a*(n/a). <https://doi.org/10.1111/ajae.12388>
- Soranno, P. A., Hubler, S. L., Carpenter, S. R., & Lathrop, R. C. (1996). Phosphorus Loads to Surface Waters: A Simple Model to Account for Spatial Pattern of Land Use. *Ecological Applications*, *6*(3), 865-878. <https://doi.org/10.2307/2269490>
- Stackpoole, S. M., Stets, E. G., & Sprague, L. A. (2019). Variable impacts of contemporary versus legacy agricultural phosphorus on US river water quality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *116*(41), 20562-20567. <https://doi.org/10.1073/pnas.1903226116>
- Sweeten, J. M., & Reddell, D. L. (1976). NONPOINT SOURCES: STATE-OF-THE-ART OVERVIEW. *Paper - American Society of Agricultural Engineers*, var pagings.
- Tanik, A., Ozalp, D., & Seker, D. Z. (2013). Practical estimation and distribution of diffuse pollutants arising from a watershed in Turkey. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *10*(2), 221-230. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s13762-012-0140-9>
- Tong, X., Zhou, Y., Liu, J., Qiu, P., & Shao, Y. (2022). Non-point source pollution loads estimation in Three Gorges Reservoir Area based on improved observation experiment and export coefficient model. *Water Science and Technology*, *85*(1), 27-38. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.508>
- Uribe, N. (2005). *Conceptos basicos y guía rápida para el usuario*. <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- US EPA, O. (2015, febrero 19). *Hydrological Simulation Program—FORTRAN (HSPF)* [Data and Tools]. <https://www.epa.gov/ceam/hydrological-simulation-program-fortran-hspf>
- Uusitalo, R., Ylivainio, K., Hyväluoma, J., Rasa, K., Kaseva, J., Nylund, P., Pietola, L., & Turtola, E. (2012). The effects of gypsum on the transfer of phosphorus and other nutrients through clay soil monoliths. *Agricultural and Food Science*, *21*(3), Article 3. <https://doi.org/10.23986/afsci.4855>
- Vanotti, M. B., Szogi, A. A., & Fetterman, L. M. (2010). *Wastewater treatment system with simultaneous separation of phosphorus and manure solids* (United States Patent US7674379B2). <https://patents.google.com/patent/US7674379B2/en>
- Vollenweider, U. E. N. C. for E. (1968). *Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication* [WEB SITE]. [https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference\\_id/37262](https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/37262)
- Wang, H., Wu, Z., & Hu, C. (2015). A Comprehensive Study of the Effect of Input Data on Hydrology and non-point Source Pollution Modeling. *Water Resources Management*, *29*(5), 1505-1521. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0890-x>
- Wang, M., Chen, L., Wu, L., Zhang, L., Xie, H., & Shen, Z. (2022). Review of Nonpoint Source Pollution Models: Current Status and Future Direction. *Water*, *14*(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/w14203217>
- White, M., Harmel, D., Yen, H., Arnold, J., Gambone, M., & Haney, R. (2015). Development of Sediment and Nutrient Export Coefficients for U.S. Ecoregions. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *51*(3), 758-775. <https://doi.org/10.1111/jawr.12270>
- Wu, L., Long, T.-Y., & Cooper, W. J. (2012). Simulation of spatial and temporal distribution on dissolved non-point source nitrogen and phosphorus load in Jialing River Watershed, China. *Environmental Earth Sciences*, *65*(6), 1795-1806. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1159-9>
- Wu, M., Tang, X., Li, Q., Yang, W., Jin, F., Tang, M., & Scholz, M. (2013). Review of ecological engineering solutions for rural non-point source water pollution control in Hubei Province, China. *Water, Air, and Soil Pollution*, *224*(5). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1561-x>
- Xie, H., & Lian, Y. (2013). Uncertainty-based evaluation and comparison of SWAT and HSPF applications to the Illinois River Basin. *Journal of Hydrology*, *481*, 119-131. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.027>
- Xue, J., Wang, Q., & Zhang, M. (2022). A review of non-point source water pollution modeling for the urban-rural transitional areas of China: Research status and prospect. *Science of The Total Environment*, *826*, 154146. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154146>
- Yang, J., Wang, Y., Fang, S., Qiang, Y., Liang, J., Yang, G., & Feng, Y. (2020). Evaluation of livestock pollution and its effects on a water source protection area in China. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*(15), 18632-18639. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06485-0>
- Zhang, T., Yang, Y., Ni, J., & Xie, D. (2020). Best management practices for agricultural non-point source pollution in a small watershed based on the AnnAGNPS model. *Soil Use and Management*, *36*(1), 45-57. <https://doi.org/10.1111/sum.12535>
- Zhang, Y., Griffith, B., Granger, S., Sint, H., & Collins, A. L. (2022). Tackling unintended consequences of grazing livestock farming: Multi-scale assessment of co-benefits and trade-offs for water pollution mitigation scenarios. *Journal of Cleaner Production*, *336*, 130449. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130449>
- Zhao, C., Li, M., Wang, X., Liu, B., Pan, X., & Fang, H. (2022). Improving the accuracy of nonpoint-source pollution estimates in inland waters with coupled satellite-UAV data. *Water Research*, *225*. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119208>

## BIOGRAFÍAS



**Monica Pérez-Sane**, Estudiante de Doctorado en Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. Ingeniero del Medio Ambiente de la Universidad de La Guajira. Su línea de investigación es contaminación del agua.



**Camilo Torres Pardo**, Profesor Asistente de la Pontificia Universidad Javeriana. Ingeniero Civil de la Universidad de Nebraska, Estados Unidos. Magister en Ingeniería Civil de la Universidad de Nebraska, Estados Unidos. Doctor en Ingeniería Agrícola y Biológica de la Universidad de Purdue, Estados Unidos. Su línea de Investigación es gestión y manejo sostenible de los recursos hídricos.



**Jaime Lara-Borrero**, Profesor Titular de la Pontificia Universidad Javeriana. Ingeniero Civil de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Magister en Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Doctor en Ingeniería de caminos, canales y puertos, énfasis en ingeniería sanitaria y ambiental de la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. Sus líneas de investigación son: Sistemas naturales de tratamiento de aguas, Humedales para tratamiento, Tratamiento de aguas residuales, Contaminación del agua, calidad del agua, Aprovechamiento de aguas lluvias, Sistemas basados en la naturaleza.

## INDEXACIONES

Scopus®

SciELO

redalyc.org UAEM

latindex  
catálogo  
2.0

DOAJ DIRECTORY OF  
OPEN ACCESS  
JOURNALS

REDIB  
Red Iberoamericana  
de Innovación y Conocimiento Científico



REVISTA  
POLITÉCNICA

MIAR  
Matriz de Información para el  
Análisis de Revistas

CiteFactor  
Academic Scientific Journals

BASE  
Bielefeld Academic Search Engine

Google  
Scholar

[revistapolitecnica.epn.edu.ec](http://revistapolitecnica.epn.edu.ec)

Academic  
Resource  
Index  
ResearchBib

INDEX COPERNICUS  
INTERNATIONAL

Crossref  
doi DIGITAL  
OBJECT  
IDENTIFIER





# REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL

ISSN: 1390-0129  
eISSN: 2477-8990  
Volumen 53, Nro. 1, Febrero · Abril 2024





ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL



REVISTA  
POLITÉCNICA



**EPN**  
*editorial*

[revistapolitecnica.epn.edu.ec](http://revistapolitecnica.epn.edu.ec)  
[www.epn.edu.ec](http://www.epn.edu.ec)